

Optimización de inspecciones en puentes con BIM: automatización y gestión eficiente

Rocío Porras Soriano^a, Fidel Lozano Galant^b, Ángela Montalvo^c, Edison Atencio Castillo^d y José Antonio Lozano Galant^b

^a Dra. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Profesora Contratado Doctor. Universidad de Castilla-La Mancha. Rocio.Porras@uclm.es

^b Dr. Arquitecto. Profesor Ayudante. Universidad de Castilla-La Mancha. Fidel.LozanoGalant@uclm.es

^c Ing. Caminos, Canales y Puertos. INECO S.A. Ingeniera. AngelaMrosalia.Montalvo@alu.uclm.es

^d Dr. Ing. Civil. Universidad de Castilla-La Mancha. Edison.Atencio@alu.uclm.es

^e Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Universidad. Universidad de Castilla-La Mancha. Joseantonio.Lozano@uclm.es

RESUMEN

Garantizar la seguridad de la infraestructura civil, especialmente los puentes, es esencial para redes de transporte sostenibles. Las inspecciones manuales actuales reducen la eficiencia y precisión de los datos. Este artículo propone una solución digital, mediante una aplicación de bajo costo basada en GIS, para optimizar las inspecciones. El protocolo digital transfiere automáticamente los datos georreferenciados al modelo BIM del puente, mejorando la toma de decisiones en mantenimiento. El enfoque se valida con la inspección de un puente en España.

ABSTRACT

Ensuring the safety of civil infrastructure, particularly bridges, is crucial for sustainable transport networks. Current manual inspections reduce data efficiency and accuracy. This article proposes a digital solution using a low-cost GIS-based application to optimize inspections. The digital protocol automatically transfers georeferenced data to the bridge's BIM model, enhancing decision-making in maintenance operations. The approach is validated through the inspection of a concrete bridge in Spain.

PALABRAS CLAVE: Digitalización, Inspección, Puentes, GIS, BIM, Mantenimiento, Infraestructura

KEYWORDS: Digitization, Inspection, Bridges, GIS, BIM, Maintenance, Infrastructure

1. Introducción

El mantenimiento continuo y las reparaciones son esenciales para asegurar condiciones funcionales y seguras a lo largo del ciclo de vida de los puentes. La ausencia o ineficiencia de estas acciones puede acelerar significativamente las patologías estructurales. La importancia de este desafío global se subraya en numerosos informes, que demuestran las implicaciones generalizadas del descuido. Por ejemplo,

aproximadamente el 43% de los puentes en EE.UU. se clasifican como estructuralmente deficientes o funcionalmente obsoletos [1]. Tasas de deficiencia similares se observan en Europa, donde el 30% de los puentes requieren reparaciones importantes o reemplazo [2], y en Australia, donde aproximadamente el 25% de los puentes principales están en mal estado y necesitan atención urgente [3].

Para optimizar las operaciones de mantenimiento y garantizar la seguridad de los puentes, se realizan inspecciones regulares in situ, proporcionando datos esenciales para evaluar el estado del puente y sus componentes mediante la asignación de índices de daño [4]. Estas inspecciones se clasifican en tres categorías: inspecciones rutinarias para exámenes visuales generales, inspecciones principales con evaluaciones más detalladas por ingenieros especializados, e inspecciones especiales realizadas en respuesta a problemas específicos identificados en evaluaciones previas [5,6,7].

Para mejorar el proceso de toma de decisiones, los datos de inspección pueden integrarse en métodos de decisión de mantenimiento, como lo demuestran investigadores como Lai et al. [8] y Lei et al. [9]. La incorporación de datos de inspección en estos métodos permite evaluaciones más informadas y precisas del estado del puente, llevando a una mejor planificación y priorización de las actividades de mantenimiento. Esta integración ayuda a identificar áreas críticas que requieren atención inmediata, optimizando la asignación de recursos y extendiendo la vida útil del puente.

Un análisis de la historia de la inspección de puentes, incluyendo las brechas y limitaciones en las técnicas usuales para la planificación de inspecciones, es presentado por Abdelrahman et al. [10]. Este trabajo revela que la mayoría de los protocolos de inspección de puentes se basan en observaciones visuales, involucrando tareas como la toma de notas en documentos impresos. La ausencia de digitalización en estos procesos puede llevar a varios desafíos y problemas, impidiendo la eficiencia y efectividad general de los procedimientos de inspección.

En el contexto de la cuarta revolución industrial, a menudo referida como Industria 4.0, la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC) está experimentando un cambio profundo impulsado por la digitalización

[11]. De hecho, en la literatura, muchos estudios destacan las ventajas potenciales de emplear Sistemas de Gestión de Puentes (BMS) [12]. Para facilitar la implementación de protocolos de inspección más precisos y eficientes, mejorando en última instancia la seguridad y longevidad de la infraestructura, estos sistemas se basan en diferentes herramientas digitales.

2. Metodología

Este estudio sigue el Método de Investigación en Ciencia del Diseño (DSRM) según lo descrito por March y Smith [13]. El objetivo principal del DSRM es crear una herramienta que aborde un problema práctico dentro de un contexto específico. En este estudio, el artefacto propuesto es un protocolo de código abierto diseñado para digitalizar las inspecciones de puentes realizadas in situ y automatizar la integración de los datos de inspección en el modelo BIM correspondiente.

2.1 Etapas del DSRM

En este apartado se describe la metodología empleada que se estructura en torno a las siguientes etapas, objetivos, actividades, herramientas y entregables.

1. Problemas observados y motivación:

Esta etapa tiene como objetivo identificar las brechas en la literatura existente. Inicialmente, esto implica una revisión sistemática de la literatura sobre la digitalización de los protocolos de inspección de puentes, las aplicaciones de GIS y BIM, y la interoperabilidad entre GIS y BIM. Esta revisión se realizó en la base de datos Scopus, siguiendo el enfoque sistemático propuesto por Komary et al. [14], Mobaraki et al. [15], y Cacciuttolo et al. [16]. Los resultados de esta etapa incluyen un resumen de los hallazgos, los objetivos de la investigación y la personalización de la metodología de investigación propuesta.

2. Definición de la solución potencial:

Para solucionar y rellenar las brechas y desafíos identificados, se propone una aplicación GIS de código abierto para la inspección de puentes y la introducción de los resultados de la inspección digital en el modelo BIM. El requisito principal de esta solución es desarrollar una plataforma digital georreferenciada integrada que combine GIS, BIM y programación paramétrica. Además, la solución debe validarse a través de un estudio de caso que demuestre su aplicabilidad práctica en escenarios del mundo real.

3. Diseño y desarrollo: Inicialmente, se elige un software de información geográfica a través de un análisis comparativo con las principales alternativas de código abierto disponibles en el mercado. Posteriormente, se desarrolla un nuevo protocolo dentro de la herramienta seleccionada para digitalizar el proceso de inspección de puentes. Luego, se crea un algoritmo de programación paramétrica para automatizar la incorporación de patologías de puentes en el modelo BIM.

2.2 Aplicación GIS de Código Abierto

En esta sección, se desarrolla una aplicación GIS de código abierto para automatizar los protocolos de inspección de puentes *in situ*. Primero, se presenta la selección del software GIS. Luego, se utiliza la herramienta elegida para desarrollar la aplicación de inspección digital. Para seleccionar el software GIS, se realizó un análisis comparativo de tres de las soluciones más prevalentes para aplicaciones de puentes: ArcGIS, QGIS y Google Earth Engine. Tras analizar las opciones, se eligió el software QGIS debido a su naturaleza de código abierto.

2.1.1. Selección del Software GIS

La selección del software GIS se basó en un análisis comparativo de las principales soluciones disponibles en el mercado. Se evaluaron tres herramientas: ArcGIS, QGIS y

Google Earth Engine. Cada una de estas herramientas tiene sus propias fortalezas y debilidades, que se listan a continuación:

- **ArcGIS:** Este software es conocido por sus extensas características de análisis espacial y su fuerte soporte y recursos de la comunidad Esri. Sin embargo, es un software propietario, lo que puede resultar en costos más altos y una curva de aprendizaje para los usuarios nuevos en GIS. ArcGIS ofrece integración con varios formatos y fuentes de datos, lo que lo hace versátil, pero su costo puede ser una barrera para algunos usuarios.

- **QGIS:** Esta herramienta de código abierto es gratuita y personalizable, con una creciente comunidad de soporte y una variedad de complementos. QGIS es compatible con múltiples plataformas, lo que lo hace accesible para una amplia gama de usuarios. Sin embargo, su interfaz de usuario puede ser menos pulida que las herramientas propietarias y el soporte técnico puede ser limitado en comparación con las soluciones comerciales.

- **Google Earth Engine:** Esta plataforma basada en la nube ofrece una amplia gama de imágenes satelitales y es poderosa para el análisis espacial y temporal a gran escala. Sin embargo, está más enfocada en aplicaciones de teledetección y puede tener una flexibilidad limitada en comparación con las herramientas GIS de escritorio.

2.3 Desarrollo de la Aplicación de Inspección Digital

Una vez seleccionado el software QGIS, se procedió al desarrollo de la aplicación de inspección digital. Los pasos para la creación de la aplicación se resumen en la Figura 1 y se detallan a continuación:

1. **Creación de formularios en QGIS:** Se crea un nuevo formulario dentro de un proyecto QGIS y se divide en las categorías definidas en el árbol de inspección.

2. **Definición de los atributos en QGIS:** Los atributos de cada categoría se personalizan

con las patologías y los índices de daño definidos en el árbol de inspección. Ejemplos de estos atributos incluyen el nombre y ID de la patología, el tiempo, las imágenes, el índice de daño y las notas.

3. Exportación a QField: El formulario de QGIS se exporta a QField para permitir la recopilación de nuevos datos, la actualización de datos existentes y la realización de tareas GIS directamente en el dispositivo, incluso en entornos sin conexión. QField proporciona una interfaz simplificada optimizada para pantallas táctiles, así como características para el seguimiento GPS, la edición de atributos, la entrada de datos basada en formularios y la sincronización de datos sin conexión.

4. Inspección digital: La aplicación QField desarrollada se utiliza para realizar la inspección del puente en un dispositivo digital.

5. Sincronización del proyecto: Los formularios de QGIS se sincronizan con la información de la inspección in situ obtenida de QField.

6. Exportación a Excel: Los formularios de QGIS se exportan a una hoja de cálculo de Excel.



Figura 1. Pasos para la creación de la aplicación.

2.4 Introducción Automática de los Resultados de la Inspección en el Modelo BIM

Para automatizar la integración de los resultados de la inspección en el software BIM se empleó un algoritmo de programación paramétrica. Para este propósito, se seleccionó Dynamo por sus capacidades robustas de programación paramétrica, mientras que Revit sirvió como la plataforma de modelado BIM. Numerosos ejemplos de interoperabilidad exitosa entre estas herramientas de software están documentados en la literatura, como lo informa Collao et al. [17].

Durante las inspecciones *in situ*, los inspectores detectan, clasifican y cuantifican manualmente los daños. Introdúcen detalles como el tipo de daño, la cuantificación y las imágenes en la herramienta desarrollada *in situ*, que almacena la información digitalmente en una carpeta interna designada. Posteriormente, un script de Dynamo automatiza la integración de estos metadatos de daños en el modelo BIM. Los resultados de la inspección se incorporan en Revit utilizando parámetros compartidos, mejorando la visualización de los daños en el modelo BIM con tablas de cantidades y etiquetas.

Los pasos secuenciales involucrados en la integración de los resultados de la inspección digital con la herramienta GIS son:

1. Importación de los resultados de la inspección desde la hoja de cálculo de Excel exportada desde QGIS.

2. Creación del tipo y categoría de parámetros compartidos para los elementos del modelo (como el tipo de elemento, ID del elemento, tipo de patología, ID de la patología e índice de severidad) según lo definido en la hoja de cálculo.

3. Lectura de los resultados de las diferentes patologías obtenidas por la inspección digital.

4. Georreferenciación de las patologías en los elementos del modelo BIM.

5. Relleno de los parámetros compartidos con la información de la patología descrita en la hoja de cálculo de Excel.

6. Incorporación de imágenes de las patologías en los parámetros compartidos de los elementos correspondientes.

La herramienta desarrollada se basa en una aplicación GIS con una representación planar (2D) del territorio. Estas coordenadas X e Y inicialmente corresponden a la posición de la tablet, lo que es útil para localizar patologías situadas en la misma posición que el inspector (e.g., a través del tablero). Dado que las mismas coordenadas planas pueden corresponder a

diferentes elementos (por ejemplo, pavimento, losa), el inspector también necesita indicar el tipo de elemento para su correcta ubicación en el modelo BIM. La herramienta también permite al inspector ajustar manualmente la ubicación de la patología tanto en la ubicación planar, cuando la posición de la tablet no puede corresponder con la patología, como en la posición vertical, cuando el daño se encuentra en un elemento vertical, como las pilas. En este último caso, la altura de la patología (coordenada Z) debe medirse in situ por el inspector.

3. Estudio de Caso: Inspección Real de un Puente

El estudio de caso seleccionado fue el PSC-02, un puente de carretera de concreto ubicado en la autopista CM-42 en la localidad de Consuegra, España.



Figura 2. Caso de estudio: localización y fotografía de la estructura real.

3.1 Descripción de la Estructura

El puente PSC-02 es una estructura de hormigón que forma parte de la autopista CM-42. La cubierta de esta estructura está compuesta por vigas prefabricadas en forma de U, con un ancho de 8 metros y una longitud de 73 metros, segmentada en tres tramos de 16+41+16 metros. Las pilas de esta estructura están hechas de hormigón armado. Una imagen de la estructura construida se presenta en la Figura 2.

3.2 Modelo BIM del Puente

El modelo BIM del puente analizado se desarrolló con un Nivel de Detalle (LOD) 300 a partir de los dibujos estructurales en Revit. Los principales elementos de este modelo se presentan en la Figura 3, junto con una vista ampliada de uno de sus estribos y pilas. Desde su construcción, esta estructura ha sido sometida a una inspección básica cada dos años y una general cada cinco años. La metodología empleada en estas inspecciones carece de digitalización, dependiendo en cambio de la toma de notas manual en documentos impresos y fotografías de las patologías. Tras las inspecciones, toda la información se digitaliza introduciendo los datos en hojas de cálculo de Excel.

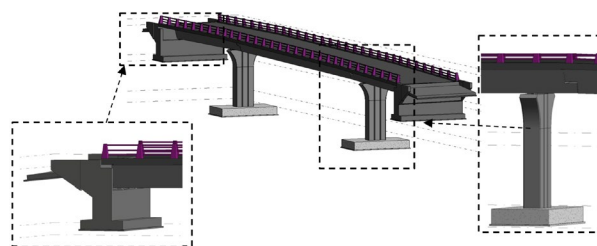


Figura 3. Caso de estudio: modelo BIM.

3.3 Resultados de la Inspección Tradicional

Los resultados de la inspección para esta estructura se documentaron inicialmente en formato impreso, detallando las patologías identificadas y proponiendo las operaciones de reparación necesarias. Esta documentación se complementó con un repositorio digital almacenado en una memoria USB que contiene imágenes de todas las patologías identificadas. Las patologías identificadas en el marco de inspección tradicional para la estructura se categorizaron en elementos distintos: estribos, pilas, cubierta y varios componentes de equipamiento (incluyendo juntas de expansión, sistemas de drenaje, pavimento, barandillas, iluminación y servicios públicos). Esta información se integró en la aplicación QGIS desarrollada para inspecciones digitales. Se

utilizó una etiqueta diferente para identificar cada patología.

3.4 Índices de Daño para la Inspección Digital

Los índices de daño para la inspección digital se definieron según los mismos criterios utilizados en todas las inspecciones manuales precedentes. Este criterio se basa en un índice de severidad que varía de 1 a 6 [18], como sigue:

- Índice 1: No se identificaron defectos.
- Índice 2: Defectos que indican que la estructura puede estar en riesgo de desarrollar patología.
- Índice 3: Defectos que indican el inicio de la evolución patológica.
- Índice 4: Defectos que indican que la evolución patológica está ocurriendo.
- Índice 5: Defectos que pueden resultar en una modificación del comportamiento de la estructura o una parte de ella.
- Índice 6: Defectos que indican la proximidad a alcanzar un estado límite de toda la estructura o parte de ella, requiriendo restricción en el uso o sacarla de servicio.

3.5 Metodología de las Inspecciones

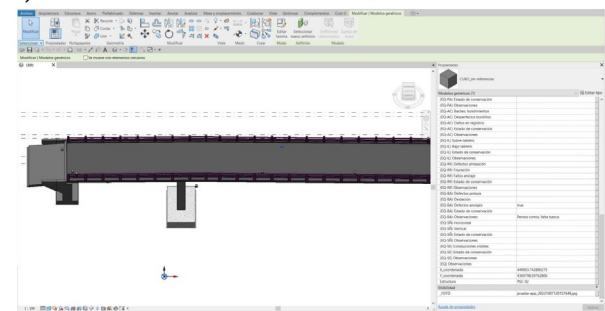
La metodología de las inspecciones fue sistemática, con el objetivo de asegurar que ningún elemento de las estructuras quedara sin revisar. Se pudo inspeccionar el neopreno de las pilas utilizando una plataforma elevadora operada por personal calificado. Todas las patologías identificadas, junto con sus imágenes acompañantes y los respectivos índices de daño de la inspección digital, se incorporaron en la aplicación desarrollada durante la inspección virtual el 24 de septiembre de 2023.

3.6 Ejemplos de Resultados de la Inspección Digital

Con la información tomada en la inspección del PSC-02 exportada a un archivo de Microsoft Excel, se puede ejecutar el script de Dynamo. De esta forma, se crean los cubos que se corresponden con los puntos de inspección. Como se observa en la Figura 4, cada cubo de inspección contiene todos los parámetros correspondientes al formulario creado con la información tomada en campo asociada.

Además, se ha creado un parámetro para la visualización de las fotos asociadas a cada elemento, por lo que, simplemente seleccionando el parámetro “_FOTO” se observa la patología fotografiada asociada.

a)



b)

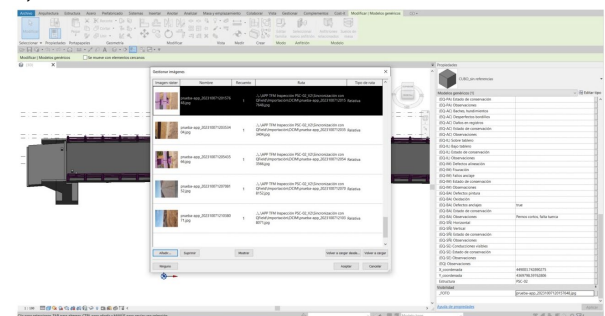


Figura 4. a) Ejemplo de la información introducida en los parámetros de los puntos de inspección con foto y b) ejemplo de visualización de la imagen asociada.

Aparte de obtener un modelo actualizado con la información inspeccionada, se pueden realizar tablas de planificación con la información que se quiera estudiar, siendo mucho más manejable y permitiendo obtener tablas muy completas. Un ejemplo se muestra a continuación, en el que se

han creado dos tablas de planificación: una primera tabla en la que se describen las patologías observadas (agrupando los campos “Observaciones”), así como su identificador y foto correspondiente (Figura 5).

Patologías observadas										
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
Identificador	(ES) Observaciones	(PI) Observaciones	(TA) Observaciones	(EQ-BA) Observaciones	(EQ-DR) Observaciones	(EQ-M) Observaciones	(EQ-J-D) Observaciones	(EQ-PA) Observaciones	FOTO	
1	Filtraciones								pruente_app_2023	
2	Desconcho con ar								pruente_app_2023	
3		Armadura vista en p							pruente_app_2023	
4	Fisuras verticales m								pruente_app_2023	
5	Resquebrajamiento								pruente_app_2023	
6	Armadura vista en								pruente_app_2023	
7		Fisuras bajo tablero							pruente_app_2023	
8		Filtraciones y sales							pruente_app_2023	
9		Rozas en base de p							pruente_app_2023	
10		Gratillo eliminado							pruente_app_2023	
11		Fisuras bajo tablero							pruente_app_2023	
12		Desconcho en apo							pruente_app_2023	
13									pruente_app_2023	
14									pruente_app_2023	
15									pruente_app_2023	
16									pruente_app_2023	
17									pruente_app_2023	
18									pruente_app_2023	
19	Armadura vista en								pruente_app_2023	
20	Filtraciones								pruente_app_2023	
21									pruente_app_2023	
22									pruente_app_2023	
23	Fisuras verticales en								pruente_app_2023	
24									pruente_app_2023	
25									pruente_app_2023	
26									pruente_app_2023	
27									pruente_app_2023	
28									pruente_app_2023	
29									pruente_app_2023	
30									pruente_app_2023	
31									pruente_app_2023	
32									pruente_app_2023	
33									pruente_app_2023	
34									pruente_app_2023	
35									pruente_app_2023	
36									pruente_app_2023	

Figura 5. Tabla de planificación de las patologías observadas en el PSC-02.

Estado de conservación de los elementos										
Identificador	Estado de conservación general	(ES) Estado de conservación	(PI) Estado de conservación	(TA) Estado de conservación	(EQ-BA) Estado de conservación	(EQ-DR) Estado de conservación	(EQ-M) Estado de conservación	(EQ-J-D) Estado de conservación	(EQ-PA) Estado de conservación	FOTO
36	1	1	1	2	2	1	1	2	2	

Patologías observadas										
Identificador	(ES) Observaciones	(PI) Observaciones	(TA) Observaciones	(EQ-BA) Observaciones	(EQ-DR) Observaciones	(EQ-M) Observaciones	(EQ-J-D) Observaciones	(EQ-PA) Observaciones	FOTO	
1	Filtraciones									
2	Desconcho con armadura vista									
3			Armadura vista en prela							
4	Fisuras verticales murete									
5	Resquebrajamiento									
6	Armadura vista en mure									
7										

Figura 6. Visualización de tablas de planificación correspondientes al PSC-02 en plano.

Por otro lado, se ha creado una segunda tabla de planificación que recoge el punto de inspección general que contiene los estados de conservación de cada elemento, así como su identificador y la foto correspondiente a la estructura general. Finalmente, la creación de estas tablas de planificación permite introducir estos datos en un plano en Autodesk Revit, de tal forma que se visualicen las imágenes correspondientes a cada punto de inspección. Estas tablas facilitan la creación de las fichas de inspección, obteniéndolas directamente desde este software. La visualización de estas tablas de planificación queda como muestra la Figura 6.

4. Conclusiones

La herramienta de inspección de puentes desarrollada ofrece ventajas notables sobre los métodos manuales tradicionales. Reduce los errores humanos asociados con la entrada manual de datos y mejora significativamente el procesamiento y la accesibilidad de los datos en comparación con los enfoques convencionales. Además, ofrece una visualización integral del estado del puente dentro del modelo BIM del puente. Sin embargo, la implementación eficiente de esta herramienta implica varios requisitos adicionales, incluyendo:

1. **Dispositivos:** Se necesitan dispositivos móviles con capacidades GIS y computadoras con especificaciones técnicas suficientes para procesar modelos BIM.
2. **Software:** La herramienta depende de varios paquetes de software, algunos como QGIS y QField son gratuitos, mientras que otros como Dynamo, Revit y MS Excel requieren una inversión adicional.
3. **Personal:** Se requieren habilidades avanzadas en programación paramétrica y modelado BIM para desarrollar la aplicación de inspección de puentes y el modelo digital del puente.

La aplicación propuesta introduce varios desafíos adicionales para la empresa. La transición de métodos tradicionales a digitales puede enfrentar una resistencia sustancial por parte de los empleados que están acostumbrados a las prácticas establecidas. Esta resistencia puede surgir de las preocupaciones sobre la adaptación a la nueva tecnología y las posibles interrupciones en los flujos de trabajo establecidos. Abordar estas preocupaciones requiere estrategias efectivas de gestión del cambio, incluyendo una comunicación clara sobre los beneficios de la nueva herramienta, la participación de los empleados en el proceso de transición y proporcionar apoyo para facilitar el cambio. Además, la capacitación integral es

esencial para asegurar que los trabajadores sean competentes en el uso de la nueva herramienta. Esta capacitación debe cubrir no solo los aspectos técnicos de la herramienta, sino también aplicaciones prácticas en escenarios del mundo real. A pesar de estos desafíos, se espera que el diseño intuitivo de la herramienta y su interfaz fácil de usar faciliten una curva de aprendizaje más suave, haciendo que sea más fácil para los usuarios adaptarse.

La principal limitación de la herramienta desarrollada es su dependencia de las inspecciones manuales *in situ*, que son propensas a errores humanos. Además, la georreferenciación del dispositivo digital depende del sistema de coordenadas planas (X e Y) utilizado por las aplicaciones GIS tradicionales. Esta limitación afecta significativamente la capacidad de la herramienta para representar y localizar con precisión las patologías en superficies verticales, como las pilas, donde la elevación (coordenada Z) es crucial. Para abordar parcialmente este problema, la herramienta incluye una función que permite a los usuarios introducir manualmente las coordenadas verticales (Z) basadas en mediciones *in situ*. Sin embargo, la entrada manual de coordenadas Z presenta varios desafíos, incluyendo una alta susceptibilidad a errores humanos y limitaciones relacionadas con los métodos y dispositivos de medición disponibles.

Además, los inspectores pueden enfrentar dificultades para acceder a ciertas áreas del puente, incluso con equipos auxiliares. Para abordar estas limitaciones, el trabajo futuro explorará la integración de tecnología de drones. Los drones equipados con sensores avanzados como LIDAR y fotogrametría pueden automatizar la captura de datos 3D de alta resolución, mejorando así la precisión de las mediciones de coordenadas Z y accediendo de manera segura a áreas de difícil acceso. Este enfoque promete superar muchos de los desafíos asociados con las mediciones manuales y

mejorar la precisión y eficiencia general de los datos.

Referencias

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE). "2021 Infrastructure Report Card," 2021.
- [2] European Commission. "2022 Infrastructure Report," 2022.
- [3] Infrastructure Australia. "Australian Infrastructure Audit 2023," 2023.
- [4] Gattulli, V., & Chiaramonte, F. "Condition Assessment by Visual Inspection for a Bridge Management System," Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, pp. 95-107.
- [5] AASHTO. "The manual for bridge evaluation," 2011.
- [6] Farrar, M. M., et al. "The AASHTO manual for bridge element inspection," ASPIRE, Winter 2014, pp. 10-11.
- [7] Federal Highway Administration (FHWA). "Bridge Inspection," 2023.
- [8] Lai, L., et al. "Synergetic-informed deep reinforcement learning for sustainable management of transportation networks with large action spaces," Automation in Construction, 2024, vol. 160, pp. 105302.
- [9] Lei, X., et al. "A deep reinforcement learning framework for life-cycle maintenance planning of regional deteriorating bridges using inspection data," Struct Multidisc Optim, 2022, vol. 65, pp. 149.
- [10] Abdelrahman, A., et al. "A State-of-the-Art Review of Bridge Inspection Planning: Current Situation and Future Needs," Journal of Bridge Engineering, 2022, vol. 22, pp. 7.
- [11] Futai, M., et al. "Challenges in the application of digital transformation to inspection and maintenance of bridges," Structure and Infrastructure Engineering, 2022, pp. 1581-1600.

[12] Shim, C. S., et al. "Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model," *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, pp. 1319-1332.

[13] March, S., & Smith, G. "Design and Natural Science Research on Information Technology," *Decision Support Systems*, 1995, vol. 15, pp. 251-266.

[14] Komary, M., et al., "A systematic literature review of digitalization in bridge inspection," *Scopus*, 2023.

[15] Mobaraki, B., et al., "Application of Low-Cost Sensors for Building Monitoring: A Systematic Literature Review," *Buildings*, 2021, vol. 11, pp. 336.

[16] Cacciuttolo, C., et al., "Low-Cost Sensors Technologies for Monitoring Sustainability and Safety Issues in Mining Activities," *Sensors*, 2023, vol. 23, pp. 6846.

[17] Collao, J., Lozano-Galant, F., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2021) BIM Visual Programming Tools Applications in Infrastructure Projects: A State-of-the-Art Review. *Applied Sciences*. 11(18), 8343. <https://doi.org/10.3390/app11188343>

[18] Red de Carreteras del Estado, Ministerio de Fomento, "Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado," 2009. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/recursos/mfom/0870250.pdf>