



Reconstrucción tridimensional y modelado BIM del Coliseo El Salitre mediante fotogrametría UAV para la preservación patrimonial

Three-dimensional reconstruction and BIM modeling of the El Salitre Coliseum using UAV photogrammetry for heritage preservation

Andrés Castillo-Velásquez ¹, Nicolás Stiven Gutiérrez-Ariza ², Alexander Cerón-Correa ³

Fecha de Recepción: 25 de enero de 2025

Fecha de Aceptación: 20 de junio de 2026

Cómo citar: A., Castillo-Velásquez, N., Gutiérrez-Ariza, A., Cerón-Correa, «Reconstrucción tridimensional y modelado BIM del Coliseo El Salitre mediante fotogrametría UAV para la preservación patrimonial», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 21–46. <https://doi.org/10.14483/22487638.23181>

Resumen

Objetivo: Proponer una metodología para la implementación de tecnologías digitales, como CAD/BIM (Building Information Modeling), a partir de la fotogrametría con drones, para mejorar la evaluación y promover la preservación del patrimonio arquitectónico, utilizando el Coliseo El Salitre en Bogotá (Colombia) como caso de estudio.

Metodología: El proceso desarrollado en este trabajo está dividido en fases: (i) planificación del vuelo, (ii) generación de la nube de puntos, (iii) evaluación de la reconstrucción mediante una estación total para establecer la calidad del modelo obtenido a partir de las condiciones usadas para la fotogrametría con drones, (iv) identificación de áreas críticas, (v) creación del modelo BIM y (vi) evaluación de los beneficios del proceso.

Resultados: La integración de la fotogrametría con drones y el BIM permitió la creación de un modelo 3D del coliseo, lo que facilitó una evaluación visual exhaustiva de su estado de conservación exterior. Los resultados destacan las ventajas significativas de combinar estas tecnologías para la conservación sostenible del patrimonio arquitectónico, particularmente en el fortalecimiento de la identidad nacional y la promoción del turismo.

Conclusiones: El uso de drones, software de fotogrametría y herramientas CAD/BIM permite la digitalización y evaluación del patrimonio cultural al proporcionar visualizaciones externas precisas que facilitan la planificación de la renovación. Esta metodología promueve el cuidado de la integridad estructural de los edificios patrimoniales y también su impacto socioeconómico a través del turismo y la preservación cultural. El estudio de caso destaca el potencial transformador de la integración de tecnologías digitales en proyectos de conservación del patrimonio.

Palabras clave: reconstrucción 3D, digitalización, patrimonio cultural, BIM, CAD, fotogrametría, drones, nubes de puntos, Coliseo El Salitre, UAV.

1 Ingeniero Civil (Universidad Militar Nueva Granada).  Miembro del semillero SIVICO. Email: est.andres.castillo3@unimilitar.edu.co

2 Ingeniero Civil (Universidad Militar Nueva Granada).  Miembro del semillero SIVICO. Email: est.nicolass.gutie2@unimilitar.edu.co

3 Ingeniero de Sistemas e Ingeniero Mecatrónico, Magister en Ingeniería Electrónica, Magister y Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Profesor asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada.  Líder del grupo de Investigación ACCEDER. Trabaja en las áreas de Computación Gráfica, Visión por Computador y Matemáticas Aplicadas. Email: alexander.ceron@unimilitar.edu.co

Abstract

Objective: To propose a methodology for the implementation of digital technologies, such as CAD/BIM (*Building Information Modeling*), based on drone photogrammetry, to improve the assessment and promote the preservation of architectural heritage, using the El Salitre Coliseum in Bogotá, Colombia, as a case study.

Methodology: The process developed in this work is divided into phases: (i) flight planning; (ii) point cloud generation; (iii) evaluation of the reconstruction using a total station to establish the quality of the model obtained under the conditions used for drone photogrammetry; (iv) identification of critical areas; (v) creation of a BIM model; and (vi) evaluation of the benefits of the process.

Results: The integration of drone photogrammetry and BIM enabled the creation of a 3D model of the Coliseum, facilitating a comprehensive visual assessment of its exterior state of conservation. The results highlight the significant advantages of combining these technologies for the sustainable conservation of architectural heritage, particularly in strengthening national identity and promoting tourism.

Conclusions: The use of drones, photogrammetry software, and CAD/BIM tools enables the digitization and assessment of cultural heritage by providing accurate external visualizations that facilitate renovation planning. This methodology promotes both the structural integrity of heritage buildings and their socioeconomic impact through tourism and cultural preservation. This case study highlights the transformative potential of integrating digital technologies into heritage conservation projects.

Keywords: 3D reconstruction, digital cultural heritage, BIM, CAD, photogrammetry, drone, point cloud processing, El Salitre Coliseum, UAV.

Introducción

El patrimonio tangible es fundamental para preservar la identidad, impulsar el desarrollo, promover la educación y proteger el medio ambiente. Infraestructuras icónicas como puentes, rascacielos y estadios, junto con espacios educativos como bibliotecas y museos, constituyen recursos valiosos para el aprendizaje, la investigación y el turismo. No obstante, uno de los principales desafíos en su conservación es la falta de información detallada sobre su diseño original y su estado actual. Esta carencia suele derivar en intervenciones de mantenimiento inadecuadas que causan daños irreparables y propician que estos bienes culturales queden relegados al olvido, perdiendo su valor social y patrimonial.

Ante esta problemática, la digitalización precisa de las características geométricas, la superficie física externa y el contexto histórico de las estructuras resulta crítica en la gestión, conservación y restauración ejecutada por entidades como el Ministerio de Cultura o el Instituto Distrital de Patrimonio Cultural (IDPC). Por ello, el desarrollo de modelos digitales tridimensionales estructurados se consolida como un requisito indispensable en la documentación del patrimonio cultural e histórico.

En la literatura especializada se registran procedimientos para la representación de fachadas mediante modelos 3D de alta calidad y texturas de resolución arbitraria, orientados a obtener interpretaciones visuales rigurosas [1]. Estos enfoques integran análisis semánticos para derivar automáticamente

dimensiones y proporciones arquitectónicas, lo que facilita la modelación de fachadas complejas. Sin embargo, al tratarse de métodos interactivos, requieren una supervisión humana considerable, circunstancia que limita su aplicabilidad en proyectos de gran escala [2].

Para superar estas limitaciones se han desarrollado métodos automatizados que emplean secuencias de imágenes superpuestas, capturadas a nivel de calle, con el fin de generar modelos 3D fotorrealistas [2]. Este abordaje combina la segmentación semántica y la partición sistemática para producir reconstrucciones detalladas, superando los sesgos de la fotogrametría aérea. De forma paralela, han emergido técnicas de mayor precisión basadas en sensores LiDAR para la generación de nubes de puntos [3]. Si bien estos sistemas ofrecen métricas de alta fidelidad, sus costos de implementación siguen siendo elevados; en consecuencia, el uso combinado de cámaras convencionales y vehículos aéreos no tripulados (drones) se posiciona como una alternativa versátil y accesible.

La fotogrametría digital y la visión por computador se han utilizado ampliamente en la digitalización del patrimonio mediante la técnica de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM). Un hito relevante en el desarrollo de esta tecnología fue la aparición del software PMVS (*Patch-based Multi-View Stereo*), el cual permite reconstruir modelos 3D a partir de múltiples imágenes capturadas desde diferentes ángulos [4].

Un ejemplo de la aplicación del método SfM es la digitalización de sitios patrimoniales en la región de Reggio Calabria, al sur de Italia [5]. En el ámbito regional, se han registrado aportes a la reconstrucción tridimensional de bienes culturales combinando la segmentación de imágenes y el algoritmo SfM mediante librerías de código abierto [6]. Por su parte, investigaciones enfocadas en piezas de menor escala exploran el uso de sensores RGB-D para la captura de información espacial mediante diversos métodos [7].

En este contexto, otros trabajos han integrado procesos de fotogrametría y SfM empleando librerías especializadas como OpenMVG (*Open Multiple View Geometry*) [8, 9].

Paralelamente, la generación de modelos digitales 3D a partir de imágenes ha cobrado un interés creciente en las áreas de procesamiento de imágenes y fotogrametría [10]. En los últimos años, el avance notable de la tecnología de drones comerciales ha permitido el desarrollo de dispositivos capaces de grabar video de alta calidad [11]. A la par, han surgido herramientas de software como Pix4Dmapper, DroneDeploy, OpenDroneMap y Agisoft Metashape, diseñadas para la generación de nubes de puntos. Frente a los métodos tradicionales de conservación —como la representación gráfica manual o la evaluación directa *in situ*—, la reconstrucción 3D ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia, precisión, fidelidad espacial, renderizado fotorrealista y capacidad de simulación [12].

En el análisis de estructuras, las fotografías capturadas por drones, combinadas con visión por computador y aprendizaje profundo (*deep learning*), facilitan la detección de daños superficiales o estructurales. No obstante, las imágenes aisladas u obtenidas de forma fragmentada suelen carecer del contexto espacial necesario para evaluar de manera integral una edificación. Asimismo, la identificación de un daño en una toma individual no permite cuantificar el deterioro global sin una georreferenciación o localización precisa. Ante esta limitación, la reconstrucción 3D surge como una solución eficaz, al permitir la visualización contextualizada de los daños sobre el modelo tridimensional para su posterior análisis, cuantificación y planificación de las tareas de conservación [13].

Un ejemplo del impacto de estas tecnologías en la conservación del patrimonio es el trabajo de [14], en el que se aplicaron técnicas de fotogrametría aérea con drones para reconstruir y documentar el conjunto basilical del yacimiento romano de Complutum. En una línea similar, se han desarrollado sistemas automatizados que combinan softwares de reconstrucción 3D —como Agisoft Metashape— con algoritmos de segmentación, lo que optimiza los tiempos de procesamiento y mejora la accesibilidad a los modelos [11].

Por otra parte, las herramientas BIM (*Building Information Modeling*), como Autodesk Revit, han facilitado la integración de las nubes de puntos generadas mediante programas de reconstrucción 3D en los flujos de gestión de datos. La metodología BIM permite una administración e intercambio de información más ágil, lo que favorece intervenciones constructivas coordinadas y coherentes. En este sentido, Autodesk Revit ofrece un entorno unificado que articula arquitectura, instalaciones y estructuras, lo que posibilita el modelado 3D detallado de edificaciones, terrenos y diversos elementos constructivos [15].

En el contexto local, el Coliseo El Salitre destaca como un inmueble de valor patrimonial excepcional. Su declaración como Bien de Interés Cultural (BIC) con nivel de conservación integral (Nivel 1), formalizada mediante la Resolución 090 de 2023, exige su salvaguarda rigurosa, de acuerdo con el artículo 20 del Decreto 763 de 2009.

Con capacidad para 5000 espectadores, este escenario se ha consolidado como un ícono del deporte bajo techo en la capital, al albergar competencias nacionales e internacionales en múltiples disciplinas. Por tanto, la gestión, operación y mantenimiento adecuados del coliseo resultan esenciales para promover la salud, el bienestar, el desarrollo comunitario, el turismo y la recreación en la ciudad. En este marco, resulta fundamental implementar herramientas como el modelado 3D para respaldar su conservación a largo plazo.

A pesar de que en Bogotá existen antecedentes sobre la conservación de monumentos patrimoniales mediante reconstrucción 3D —como los estudios aplicados a la escultura de La Rebeca o al busto de

Fabio Lozano Simonelli —, no se registra un trabajo enfocado específicamente en la estructura envolvente del Coliseo El Salitre [16, 17].

Por estas razones, la presente investigación tiene como objetivo principal desarrollar la reconstrucción tridimensional externa del Coliseo El Salitre a partir de fotogrametría aérea y la metodología BIM, con el propósito de identificar patologías visibles en la fachada y planificar futuras intervenciones de conservación. Este enfoque representa un aporte novedoso al aplicar tales tecnologías a un equipamiento deportivo de carácter patrimonial en el contexto colombiano, rellenando así un vacío documental en la preservación de esta tipología edificatoria.

1.1. Marco normativo para el vuelo de drones

La normativa aplicable a las aeronaves no tripuladas en Colombia se encuentra estipulada en el Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 100), el cual clasifica estas aeronaves según su peso y propósito dentro del territorio nacional, además de establecer sanciones para quienes incumplan sus disposiciones. Entre los aspectos más relevantes de esta reglamentación que enmarcan este trabajo se destacan las siguientes condiciones para su uso:

- Los vuelos, ya sean diurnos o nocturnos, deben realizarse bajo las condiciones y reglas de operación aplicables según la categoría del equipo.
- La categoría abierta corresponde a las operaciones no comerciales (sin ánimo de lucro) que se realizan con una aeronave no tripulada, con un peso (masa) bruto máximo de operación de hasta 25 kilogramos.
- Está prohibido volar sobre áreas densamente pobladas, edificaciones o aglomeraciones de personas sin la autorización previa requerida.
- No se podrá volar a menos de 30 metros horizontales o verticales de cualquier edificación, sin que puedan superarse 400 pies (122 m) sobre el terreno y sólo se podrá operar para mantenerse dentro de la visibilidad en línea de vista (VLOS).
- No está permitido volar en zonas restringidas o prohibidas, como instalaciones militares, policiales o penitenciarias.
- Se prohíbe volar dentro de un radio de 2 km de cualquier lugar donde se encuentren el Presidente de la República.

La normativa mencionada fue revisada y aplicada rigurosamente en este trabajo. Dentro de los aspectos verificados, se determinó si el polígono de estudio se encontraba ubicado dentro de alguna zona protegida o restringida para el espacio aéreo.

2. Materiales y métodos

En esta sección se presentarán algunos de los equipos y herramientas utilizadas, así como la metodología utilizada en este trabajo.



Figura 1. Dron utilizado en el proyecto

Fuente: Autores.

2.1. Equipos utilizados

2.1.1. Dron

El UAV usado en el proyecto es el dron DJI MAVIC MINI (Figura 1), dron compacto y ligero destacado por su cámara de alta calidad capaz de realizar tomas nítidas gracias a su estabilizador. Cuenta con las siguientes características:

- 249 gramos
- desplegado 159×202×55 mm (L×W×H)
- máxima 3000 metros
- máximo de vuelo: 30 minutos (por batería)
- 3 ejes (inclinación, giro, giro)
- 12 MP
- de vídeo: 2.7K, FHD
- Imagen: JPEG
- Formato de vídeo: MP4

2.1.2. Computador utilizado

La Tabla 1 muestra la información de la capacidad de la herramienta computacional utilizada para la reconstrucción del coliseo:

Tabla 1. Información del hardware y software del sistema

Sistema	
Nombre del software	Agisoft Metashape Professional
Versión del software	1.8.4 build 14654
OS	Windows 64 bit
RAM	15.21 GB
CPU	AMD Ryzen 9 7845HX with Radeon Graphics
GPU (s)	AMD Radeon (TM) 610M (gfx1036) NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU

2.2. Metodología

Para cumplir los objetivos planteados en este proyecto, la metodología se estructuró en cinco fases. En primer lugar, se realiza la planificación y ejecución del vuelo para la captura de imágenes mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV), orientado a registrar en detalle la envolvente externa del escenario deportivo. En segundo lugar, se genera la nube de puntos tridimensional mediante el algoritmo de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM), empleando herramientas de fotogrametría de código abierto para obtener dimensiones métricas como alturas y longitudes. En tercer lugar, se evalúa la calidad de la reconstrucción 3D mediante métricas cuantitativas que incluyen el error de reproyección y el cálculo de indicadores de precisión (MAE, MSE y RMSE), contrastando las dimensiones del modelo frente a mediciones de campo obtenidas con estación total. En cuarto lugar, se desarrolla el modelo BIM (*Building Information Modeling*) y se identifican las patologías o anomalías visibles en la edificación. Finalmente, se analizan las ventajas y limitaciones del flujo metodológico implementado. En la Figura 2 se esquematizan las distintas etapas de la reconstrucción tridimensional del Coliseo El Salitre a partir de las imágenes capturadas con el UAV.

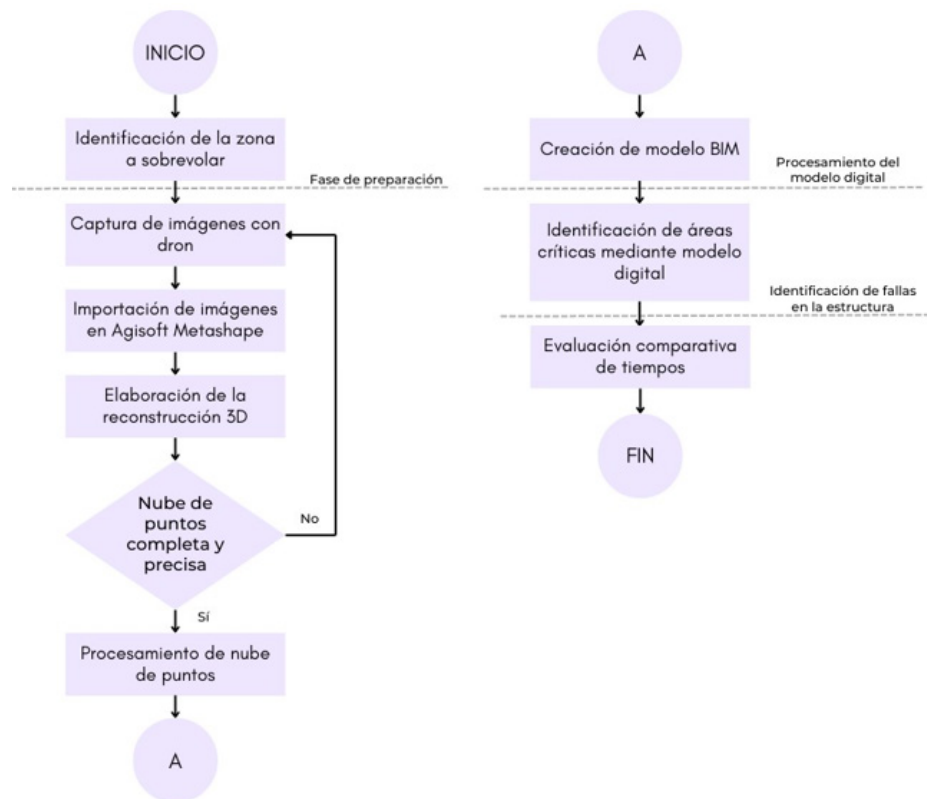


Figura 2. Proceso metodológico

Fuente: Autores.

2.2.1. Preparación del vuelo

Para realizar el levantamiento fotogramétrico de una edificación mediante el uso de aeronaves no tripuladas (UAV), es indispensable evaluar previamente las condiciones del entorno con el fin de cumplir con las disposiciones normativas y mitigar riesgos operacionales. Entre estos aspectos destacan la planificación rigurosa del plan de vuelo y el mapeo previo de obstáculos.

El plan de vuelo se diseñó considerando la geometría del Coliseo El Salitre y la presencia de elementos aislados en su entorno inmediato, principalmente luminarias de gran altura y masa arbórea. A fin de garantizar la seguridad de la operación y minimizar la ocurrencia de oclusiones en las imágenes, se fijó una altitud de vuelo superior a la cota máxima de dichos obstáculos. La ausencia de edificaciones colindantes de gran altura permitió establecer una geometría de adquisición homogénea, lo que facilitó la captura de fotogramas con alto porcentaje de solape (traslape longitudinal y transversal) y una cobertura integral de la estructura. Estas condiciones optimizaron la robustez del procesamiento fotogramétrico y la precisión métrica del modelo tridimensional. En la Figura 3 se ilustra la distribución espacial de las posiciones de toma (*camera stations*) registradas durante el vuelo.

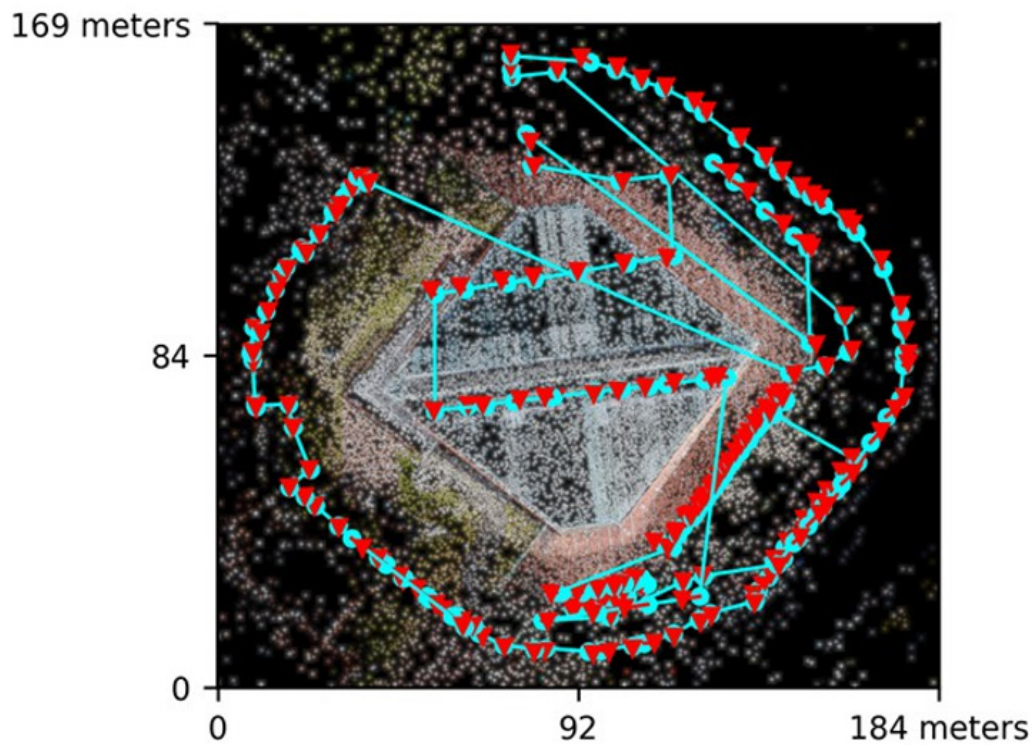


Figura 3. *Vuelo realizado*

Fuente: Autores.

Asimismo, las variables meteorológicas constituyen un factor crítico, toda vez que fenómenos como ráfagas de viento, precipitación o escasa visibilidad comprometen la estabilidad de la aeronave, deterioran la calidad radiométrica de las imágenes e incrementan el riesgo de incidentes. Del mismo modo, variaciones en la iluminación solar pueden alterar la consistencia semántica del levantamiento. Para mitigar estas fuentes de error, se consultaron los pronósticos meteorológicos locales y se programaron las operaciones en franjas matutinas, reduciendo la exposición a turbulencias eólicas e intensas sombras. La captura bajo estas condiciones garantizó un nivel de iluminancia uniforme, evitando sombras arrojadas y contrastes excesivos que dificultaran la correlación de puntos homólogos.

Finalmente, antes del despegue se realizó la prospección del polígono de estudio para identificar elementos de riesgo como postes, tendidos eléctricos y cobertura vegetal. En la Figura 4 se detallan los obstáculos identificados en la fase previa al vuelo. Mediante levantamiento topográfico con estación total, se determinó que la altura máxima de las estructuras de iluminación circundantes es de 18,77 m, valor tomado como cota de referencia para definir el plano de vuelo seguro.



Figura 4. *Obstáculos encontrados cerca al coliseo*

Fuente: Autores.

2.2.2. Captura de imágenes

En esta fase se capturaron imágenes de la envolvente del escenario deportivo mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV) DJI Mini 1, lo que permitió ejecutar tomas desde diferentes altitudes y ángulos de inclinación para optimizar la resolución espacial y el nivel de detalle.

El levantamiento aerofotogramétrico se inició con la ejecución de patrones de vuelo alrededor de la edificación. Se capturaron imágenes oblicuas comenzando desde cota baja e incrementando la altitud progresivamente, manteniendo la separación respecto a los obstáculos previamente identificados. Para garantizar una reconstrucción tridimensional consistente, se consideró un solapamiento (traslape) longitudinal y transversal recomendado de entre el 70 % y el 80 %, por lo que fue indispensable delimitar previamente el área de cobertura. El polígono levantado abarca una superficie aproximada de 16000 m²

La reconstrucción tridimensional se llevó a cabo a partir de un conjunto de 205 fotogramas aéreos. Las imágenes obtenidas fueron procesadas mediante los softwares Agisoft Metashape y OpenDrone-Map para la generación de la nube de puntos y el posterior modelado 3D.

2.2.3. Estructura desde el movimiento

Esta fase contempló la reconstrucción tridimensional a partir de las imágenes capturadas con el UAV, mediante el método de estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM). El procesamiento se realizó inicialmente con el software Agisoft Metashape, con el objetivo de generar una nube de puntos densa que sirviera como insumo para la construcción del modelo BIM en Autodesk Revit.

En las Figuras 5 y 6 se esquematizan las etapas principales para la obtención de la nube de puntos 3D mediante Agisoft Metashape. El flujo de trabajo abarca desde la importación de las imágenes hasta la alineación y generación de las nubes de puntos dispersa y densa. El proceso inicia con la carga de las

fotografías aéreas del Coliseo El Salitre en la plataforma; posteriormente, el software detecta puntos característicos (*features*) en las imágenes y ejecuta la orientación relativa mediante la correspondencia de puntos homólogos. Esto permite computar la nube de puntos dispersa, calibrar las posiciones y orientaciones de las cámaras (*camera alignment*) y, finalmente, derivar una malla poligonal 3D fotorrealista útil para la inspección visual e identificación de patologías en la estructura.

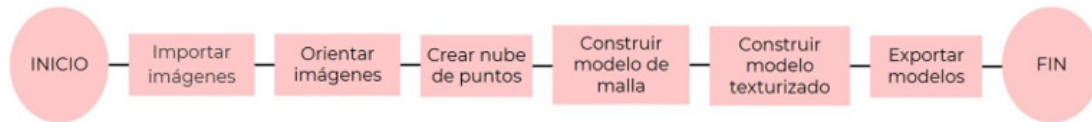


Figura 5. Flujo de trabajo estándar de un software de fotogrametría para la reconstrucción de modelos 3D.

Fuente: Autores.

La técnica SfM posibilitó la generación de productos fotogramétricos clave —tales como nubes de puntos y mallas poligonales— que proporcionan información geométrica detallada sobre la envolvente del escenario, facilitando la toma de decisiones respecto a eventuales intervenciones de mantenimiento o restauración.

De manera complementaria a la solución comercial de Agisoft, se realizó un procesamiento alternativo utilizando WebODM, la interfaz web de OpenDroneMap (ODM). Esta plataforma de código abierto permite procesar imágenes de UAV para generar nubes de puntos, modelos 3D y ortomosaicos. El entorno de trabajo se desplegó sobre un sistema operativo Ubuntu 22.04 mediante contenedores Docker. El flujo de procesamiento implementado comprendió las siguientes etapas:



Figura 6. Esquema de procesamiento de imágenes con el software de fotogrametría.

Fuente: Autores.

1. Detección y emparejamiento de características.
2. Estimación de parámetros de cámara mediante SfM.
3. Generación de nube de puntos dispersa.
4. Reconstrucción de nube de puntos densa.
5. Generación de malla y texturizado.
6. Georreferenciación utilizando coordenadas GPS embebidas en las imágenes.

2.2.4. Construcción de modelo BIM

El proceso *Scan-to-BIM* se estructuró en cuatro etapas principales: (i) adquisición fotogramétrica mediante UAV, (ii) generación de la nube de puntos densa georreferenciada, (iii) importación de la nube de puntos en el entorno CAD/BIM y (iv) modelado paramétrico de los componentes arquitectónicos representativos.

Durante esta última fase se ejecutaron operaciones de ajuste y ajuste geométrico sobre la nube de puntos para definir elementos volumétricos principales como cubiertas, muros y apoyos estructurales. Estos elementos se representaron mediante familias y objetos BIM paramétricos simplificados con un Nivel de Desarrollo LOD 200 (*Level of Development*). Se adoptó este nivel debido a que el objetivo central del estudio fue documentar la volumetría general del inmueble y generar una representación digital orientada a la preservación patrimonial, sin abarcar un diagnóstico constructivo de detalle ni la gestión operativa de mantenimiento. El nivel LOD 200 permite caracterizar con precisión la configuración espacial y la envoltura arquitectónica del bien cultural. Posterior al modelado, se realizó la identificación y georreferenciación de las anomalías o patologías visibles detectadas en las imágenes aéreas sobre el modelo tridimensional.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados del proceso de reconstrucción tridimensional. En primer lugar, se exhiben las nubes de puntos generadas mediante las herramientas fotogramétricas evaluadas, seguidas de su correspondiente validación métrica y cuantitativa. A continuación, se detallan las zonas críticas y patologías identificadas en la envoltura del inmueble que requieren atención prioritaria. Finalmente, se expone el modelo paramétrico CAD/BIM desarrollado y se realiza una estimación comparativa de los beneficios operativos del flujo de trabajo UAV-BIM en relación con las metodologías tradicionales.

3.1. Reconstrucción 3D en Agisoft

Para realizar la reconstrucción tridimensional se siguió el flujo de trabajo propuesto. El software Agisoft Metashape facilita la generación de modelos texturizados que optimizan la visualización de la estructura. Estos modelos se derivan de la triangulación de la nube de puntos, razón por la cual es indispensable completar previamente la fase de densificación. Las mallas resultantes permiten una gestión más eficiente de la información, lo que acelera y precisa la identificación de vulnerabilidades o deterioros sobre un entorno digital unificado. Esta capacidad constituye una de las principales ventajas del levantamiento aerofotogramétrico mediante UAV, al optimizar las etapas de inspección y evaluación de la envolvente. Como productos principales del proceso fotogramétrico se obtuvieron la nube de puntos densa y el modelo texturizado.

La nube de puntos densa (ver Figura 7) se generó ajustando el parámetro de densidad en nivel alto y aplicando un filtrado de profundidad agresivo. Este procedimiento arrojó un total de 39 741 180 puntos, con un tiempo de cómputo de 23 minutos y 9 segundos, un consumo de memoria de 6,48 GB y un tamaño de archivo resultante de 584,54 MB.



Figura 7. Nube de puntos densa del coliseo El Salitre.

Fuente: Autores.

Por su parte, el modelo 3D texturizado (ver Figura 8) requirió un tiempo de procesamiento total de 18 minutos, un consumo de memoria de 7,33 GB y generó un archivo con un tamaño final de 313,45 MB.

3.2. Reconstrucción 3D en ODM

Para obtener resultados más accesibles se realizó una evaluación del proceso de reconstrucción mediante el software abierto OpenDroneMap.



Figura 8. *Modelo texturizado del coliseo El Salitre.*

Fuente: Autores.

3.2.1. Indicadores generales de reconstrucción

En las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6 se presentan los indicadores generales de reconstrucción del coliseo.

Tabla 2. *Estadísticas generales de reconstrucción*

Parámetro	Valor
Imágenes reconstruidas	205/205 (100 %)
Puntos dispersos reconstruidos	155988
Puntos dispersos detectados	183544
Porcentaje de puntos reconstruidos	85.00%
Puntos de nube densa	1.5E+07
GSD promedio	0.8 cm/pixel
Características detectadas	6066
Características reconstruidas	2737
Referencia geográfica	GPS
Error GPS total	1.41 m

3.2.2. Calidad del ajuste fotogramétrico

Tabla 3. *Error promedio de reproyección*

Métrica	Valor
Error normalizado	0.13
Error en píxeles	0.76 px Error
angular	0.00022 rad

Los resultados muestran un error promedio de reproyección de 0.76 píxeles, valor considerado adecuado para aplicaciones fotogramétricas basadas en UAV de consumo.

3.2.3. Longitud de seguimiento de características

La longitud promedio de los tracks indica que las características fueron observadas en múltiples imágenes, favoreciendo la estabilidad geométrica de la reconstrucción.

Tabla 4. Longitud promedio de tracks

Métrica	Valor
Average Track Length	3.90 imágenes
Average Track Length (>2)	5.28 imágenes

3.2.4. Errores GPS

Tabla 5. Errores GPS reportados por ODM

Componente	Media (m)	Desv. Est. (m)	RMS (m)
X	0.000	1.299	1.299
Y	0.000	0.901	0.901
Z	0.000	0.670	0.670
Total		1.410	

3.2.5. Errores geométricos 3D

Gracias al uso de la herramienta ODM se obtuvo una estimación de los errores geométricos, los cuales se consignaron en la Tabla 6. Dado que estos errores indican valores altos, se planteó realizar una medición con una estación total para evaluar de manera más tangible las medidas del modelo.

Tabla 6. Errores geométricos 3D

Componente	Media (m)	Desv. Est. (m)	RMS (m)
X	0.331	3.016	3.034
Y	0.175	0.889	0.906
Z	0.823	10.431	10.463
Total		1.052	

3.2.6. Comparación con mediciones de estación total

Para obtener valores de referencia precisos de las alturas y dimensiones lineales de la edificación (ver Figura 9), se utilizó una estación total Topcon ES-105 (ver Figura 10). Estas mediciones de campo se compararon con las magnitudes extraídas del modelo 3D, cuyos resultados se sintetizan en la Tabla 7.

La validación métrica se llevó a cabo mediante siete mediciones independientes tomadas con la estación total. Si bien este conjunto de datos permitió estimar el error geométrico global del modelo, investigaciones futuras deberían incorporar una mayor densidad de puntos de control sobre el terreno (GCP, por sus siglas en inglés) distribuidos espacialmente en la envolvente del inmueble, con el fin de obtener una caracterización estadística más robusta.

El procesamiento fotogramétrico logró alinear e incorporar el 100 % de las imágenes aéreas capturadas, lo que evidencia una superposición adecuada entre fotogramas y una correcta detección y correspondencia de puntos característicos. La comparación entre las distancias reales medidas en campo y las calculadas sobre la nube de puntos arrojó un error absoluto medio (MAE) de 0,203 m (20,3 cm), un error cuadrático medio (RMSE) de 0,246 m (24,6 cm) y una desviación estándar de 0,15 m (15,0 cm).

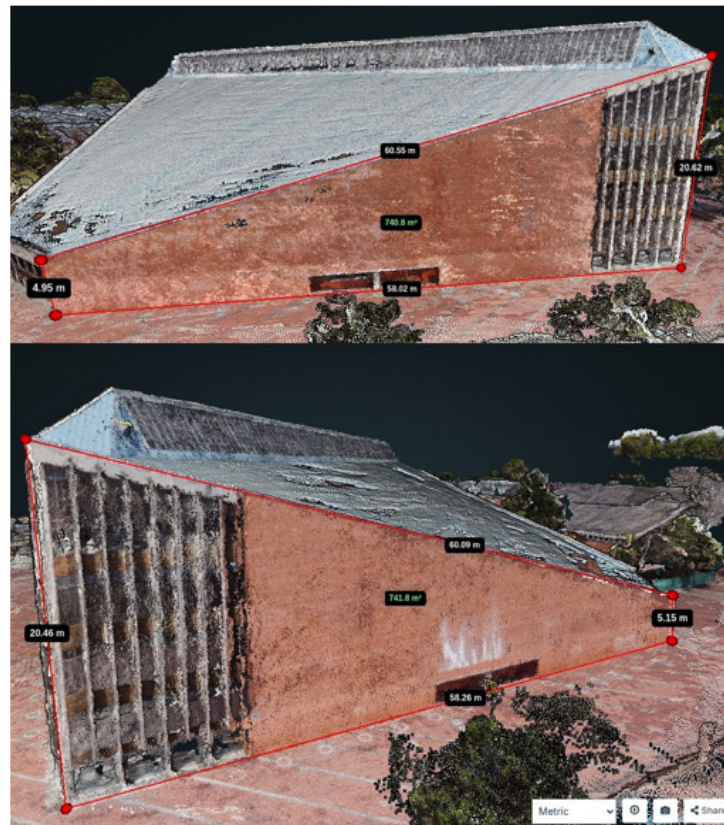


Figura 9. Medidas obtenidas usando ODM de las fachadas oriental y norte.

Fuente: Autores.

El error de reproyección promedio de 0.76 píxeles indica una buena consistencia interna del modelo fotogramétrico [18]. Este resultado sugiere que el ajuste de cámaras realizado por OpenDroneMap fue exitoso y que la correspondencia entre puntos característicos fue adecuada.

La nube de puntos densa generada contiene aproximadamente 14.8 millones de puntos, permitiendo representar con elevado nivel de detalle la escena observada.

El GSD promedio de 0.8 cm/píxel indica una resolución espacial elevada, adecuada para aplicaciones de inspección visual y reconstrucción tridimensional detallada.

3.2.7. Identificación de patologías visibles y condiciones de deterioro

El análisis del modelo digital reveló diversas lesiones en la envolvente del inmueble, así como la presencia de obras inconclusas en la fachada posterior del coliseo que permanecen paralizadas desde 2019. Estas condiciones han afectado el desarrollo regular de las actividades deportivas y deterioran la percepción del valor patrimonial entre usuarios, deportistas y transeúntes. Esta situación reafirma la urgencia de ejecutar procesos de digitalización, conservación y restauración en equipamientos de alta relevancia para la ciudad (Figura 11).



Figura 10. Validación con estación total.

Fuente: Autores.

Asimismo, la paralización de dichas intervenciones obligó a la instalación de polisombras o telas de cerramiento perimetral, lo que genera una falsa impresión de restricción total en el acceso al escenario. En la patología edilicia, la vulnerabilidad de una edificación se manifiesta mediante lesiones que se clasifican según su origen, el grado de severidad y la extensión del área afectada, abarcando desde deterioros estéticos o superficiales hasta daños estructurales severos que podrían comprometer la estabilidad global o parcial del inmueble.

En el Coliseo El Salitre se identificaron principalmente patologías asociadas a manchas de humedad y eflorescencias en muros de mampostería. Estas manifestaciones son causadas por la migración y acumulación de agua, la cual transporta sales solubles que cristalizan en la superficie al evaporarse, generando depósitos salinos de color blanco. Para su mitigación se requiere la corrección de las filtraciones de origen, la limpieza química de la zona afectada y la aplicación de sistemas impermeabilizantes.

Adicionalmente, se detectaron fisuras de trazado vertical, originadas comúnmente por asentamientos diferenciales del terreno, fenómenos de dilatación y contracción térmica o insuficiencia en el refuerzo estructural.

Si bien las imágenes aéreas capturadas por el UAV permitieron detectar indicios de deterioro, las tomas fragmentadas por sí solas carecen del contexto espacial necesario para evaluar de forma integral la estructura. La identificación de un daño en un fotograma aislado impide cuantificar adecuadamente el estado general de la edificación sin una georreferenciación precisa del hallazgo. En este sentido, la reconstrucción tridimensional constituye una herramienta eficaz para geolocalizar, cuantificar y visualizar las patologías directamente sobre el modelo digital de la envolvente.

A partir del modelo tridimensional generado, fue posible diagnosticar el estado actual de la estructura y mapear las lesiones visibles. De este modo, la implementación del flujo de digitalización contribuye a consolidar los conceptos de patrimonio virtual y humanidades digitales en el contexto local, sirviendo como insumo documental para futuras intervenciones de conservación.

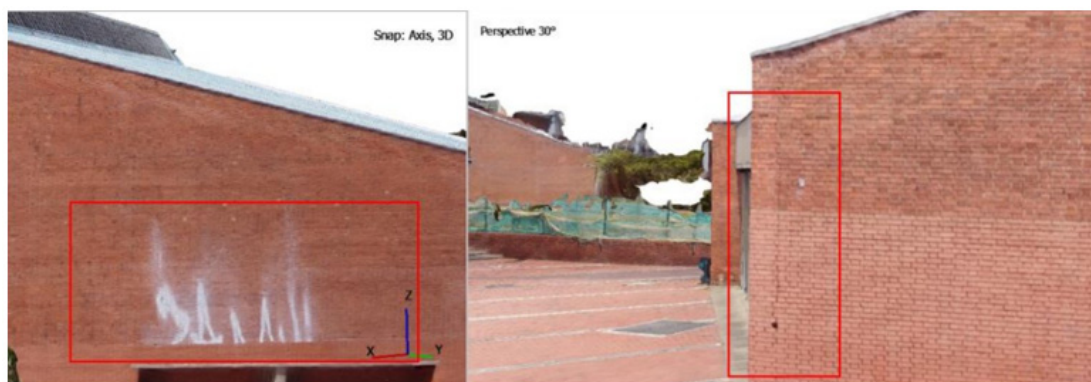


Figura 11. *Identificación de patologías en el coliseo El Salitre.*

Fuente: Autores.

Tabla 7. Comparación entre mediciones obtenidas mediante estación total y el modelo generado con OpenDroneMap

Estación Total (m)	ODM (m)	Diferencia (m)	Error Cuadrático (m ²)
58.44	58.02	0.42	0.1764
5.05	4.95	0.10	0.0100
20.99	20.62	0.37	0.1369
15.36	15.27	0.09	0.0081
58.54	58.26	0.28	0.0784
5.23	5.15	0.08	0.0064
15.30	15.22	0.08	0.0064
Error absoluto medio (MAE)			0.2028
Error cuadrático medio (MSE)			0.0604
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			0.2457

3.2.8. Creación de modelo BIM

Gracias a la interoperabilidad entre las soluciones de Autodesk, la nube de puntos densa generada en la fase fotogramétrica se exportó en formato estándar LAS (*LiDAR Data Exchange Format*). Posteriormente, este archivo fue procesado e indexado mediante Autodesk ReCap Pro para convertirlo al formato de proyecto RCP (*ReCap Project*), optimizado para su integración directa en flujos de trabajo BIM. Finalmente, el archivo RCP se vinculó como plantilla espacial en Autodesk Revit, lo que permitió interpretar la nube de puntos y modelar paramétricamente la envolvente tridimensional del Coliseo El Salitre.

Para la estructuración del modelo BIM, se definieron inicialmente las entidades arquitectónicas principales. En el entorno de Revit, se crearon y parametrizaron las familias de muros, configurando sus componentes de capa, materiales y espesores. Tomando como referencia la vista de la planta del Nivel 1 y la nube de puntos 3D, se insertaron los cerramientos verticales correspondientes (ver Figura 12). Posteriormente, desde las elevaciones Norte, Sur, Este y Oeste, se ajustaron las alturas, longitudes y vanos de los muros, ejecutando particiones específicas para la integración de los sistemas de muro cortina (ver Figura 13).

Una vez acoplada la estructura vertical de muros, se procedió al modelado de la cubierta (ver Figura 14), ajustando sus puntos de control topológicos para alinear sus pendientes y aristas con la geometría real extraída de la nube de puntos. Las carpinterías de puertas y ventanas se incorporaron mediante la carga de familias paramétricas de la biblioteca de Autodesk, posicionándolas sobre las aperturas previamente identificadas en la representación tridimensional (ver Figura 15). Desde la paleta de propiedades se asignaron las cotas de desfase e antepecho con respecto al Nivel 1 para garantizar su correcta altimetría. Finalmente, se generaron los renderizados de las vistas axonométricas y planos arquitectónicos, aplicando mapas de texturas y materiales que aportan fidelidad gráfica al modelo tridimensional (ver Figuras 16, 17 y 18).

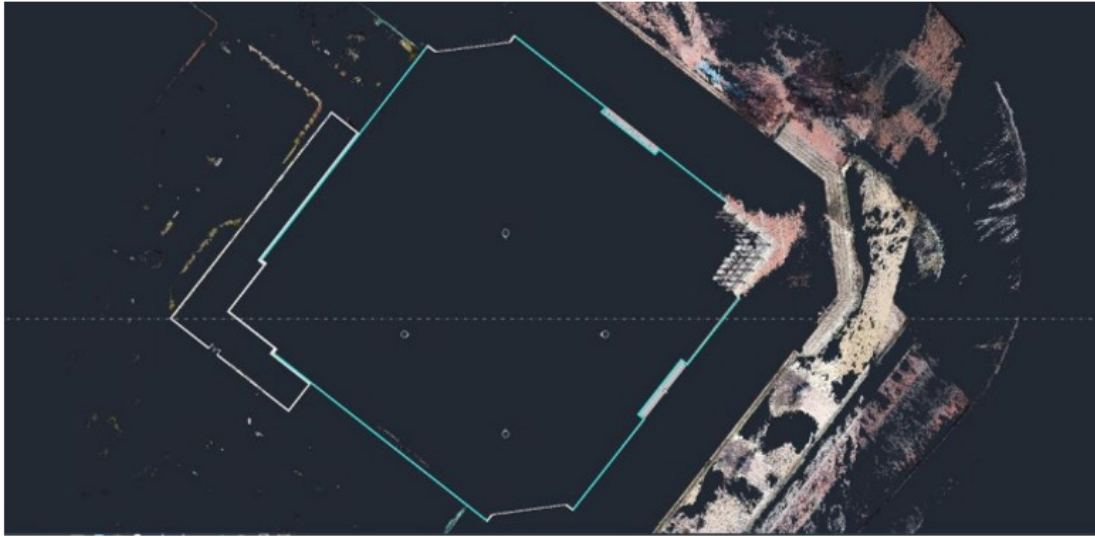


Figura 12. *Proceso para insertar un muro en Revit*

Fuente: Autores.

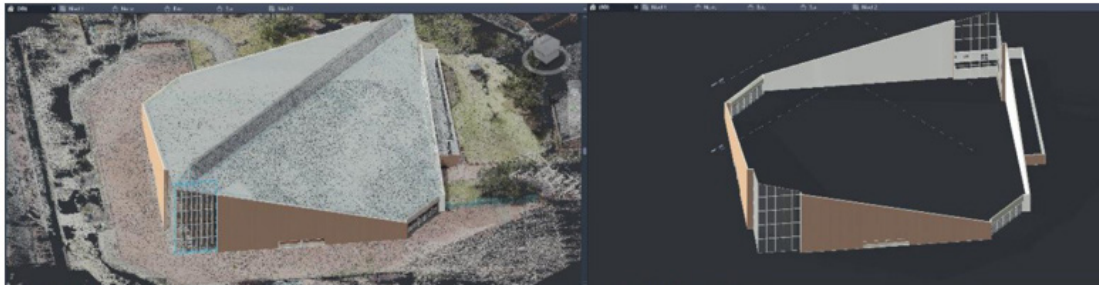


Figura 13. *Edición de los muros del coliseo*

Fuente: Autores.

3.2.9. Estimación de beneficios operativos del flujo UAV-BIM

La documentación geométrica del Coliseo El Salitre se realizó mediante un flujo de trabajo integrado por vehículos aéreos no tripulados (UAV), reconstrucción fotogramétrica y modelado BIM. Aunque en este estudio no se ejecutó de forma paralela un levantamiento convencional basado únicamente en métodos manuales, los tiempos registrados permiten identificar claras ventajas operativas asociadas al empleo de tecnologías digitales en la documentación del patrimonio.

En la Tabla 8 se resumen las principales actividades desarrolladas durante el proyecto con sus respectivos tiempos de ejecución. Por su parte, en la Tabla 9 se expone una evaluación cualitativa que compara el flujo propuesto frente a los métodos tradicionales de documentación arquitectónica.

El principal beneficio observado radica en la reducción significativa del trabajo de campo: la captura fotogramétrica aérea permitió adquirir la información geométrica detallada de la totalidad de la envolvente exterior del inmueble en una sola jornada de adquisición. Asimismo, la nube de puntos generada proporcionó una representación tridimensional continua, lo que facilitó la construcción del modelo BIM y minimizó la necesidad de realizar mediciones manuales complementarias o reiterativas durante la fase de gabinete.

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de fotogrametría con UAV y modelado BIM constituye una alternativa eficiente para la documentación de bienes culturales. Si bien no se realizó un contraste experimental directo con métodos tradicionales, la metodología aplicada permitió optimizar las campañas de captura en campo y consolidar una representación tridimensional integral. En este sentido, el modelo BIM alcanzado constituye una valiosa aproximación a la preservación digital del patrimonio, susceptible de ser enriquecida en investigaciones futuras mediante la incorporación de información semántica y niveles de desarrollo superiores (*Level of Development*), propios de los entornos HBIM (*Heritage Building Information Modeling*).

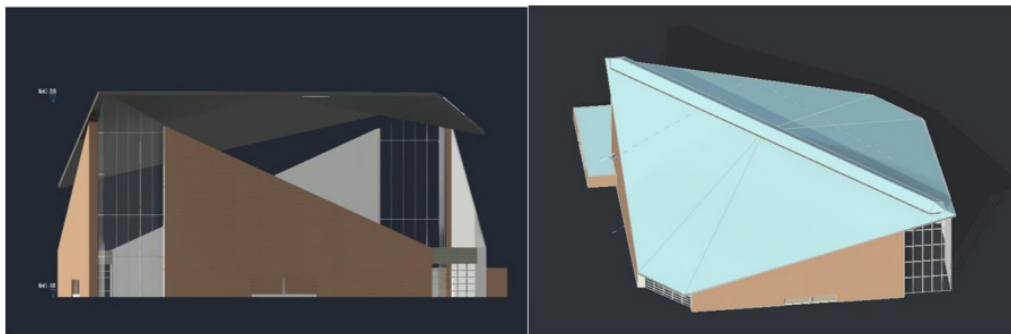


Figura 14. Representación de los muros y ventanas

Fuente: Autores.



Figura 15. Vista del modelo BIM del coliseo

Fuente: Autores.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de plataformas UAV de bajo costo, combinadas con software de código abierto para reconstrucción fotogramétrica, permite generar modelos tridimensionales de la envolvente de edificaciones emblemáticas como el Coliseo El Salitre, como paso previo a la estructuración de modelos CAD/BIM representativos. La validación geométrica contra mediciones independientes de estación total arrojó un error cuadrático medio (RMSE) de 0,246 m y un error absoluto medio (MAE) de 0,203 m, lo que proporciona una referencia métrica objetiva sobre la precisión alcanzada por la reconstrucción.

El proceso de digitalización del escenario deportivo, basado en imágenes de alta resolución capturadas desde múltiples ángulos y altitudes, permitió generar el modelo 3D del inmueble y caracterizar las patologías presentes en la mampostería de fachada. Específicamente, se identificaron e infraestructuras con grietas y eflorescencias causadas por la migración de humedad.

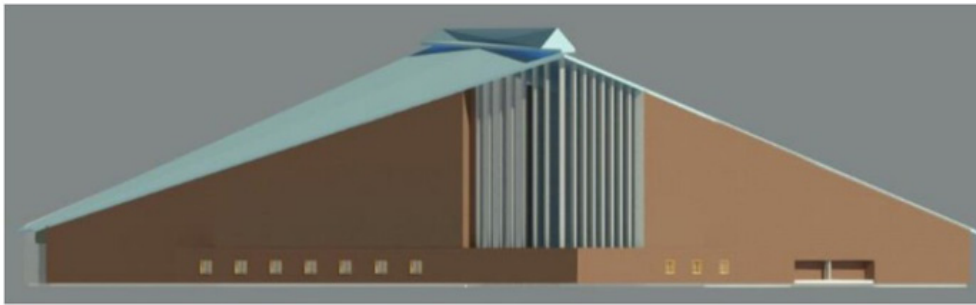


Figura 16. Vista frontal del coliseo del modelo BIM

Fuente: Autores.

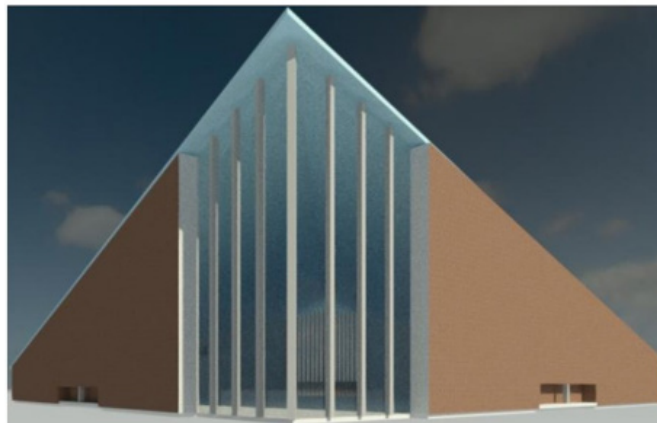


Figura 17. Vista frontal del coliseo del modelo BIM

Fuente: Autores.

El flujo de trabajo implementado en el entorno BIM facilitó la transformación de la nube de puntos en representaciones paramétricas e imágenes de alta definición para el análisis geométrico y compositivo de la estructura. El modelo se desarrolló bajo un Nivel de Desarrollo LOD 200, el cual define las dimensiones, proporciones y formas generales de los elementos representativos —como muros de mampostería, vanos de ventanas y la geometría de la cubierta— sin incursionar en detalles constructivos complejos.

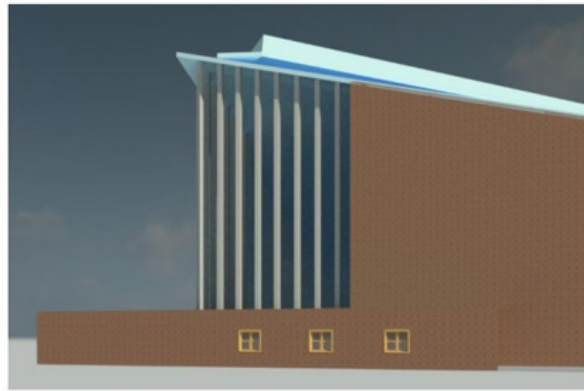


Figura 18. *Vista costado derecho del coliseo del modelo BIM*

Fuente: Autores.

Esta representación digital constituye una herramienta de soporte para la documentación, gestión de mantenimiento e intervenciones futuras en el inmueble, además de servir como marco de referencia para el levantamiento de tipologías arquitectónicas similares. Asimismo, los hallazgos sugieren que el flujo integrado UAV-fotogrametría-BIM optimiza significativamente los tiempos de captura en campo frente a los enfoques convencionales basados en mediciones manuales extensivas.

En conclusión, la metodología aplicada demuestra que la reconstrucción 3D y el modelado BIM permiten preservar digitalmente la geometría exterior de bienes de valor patrimonial como el Coliseo El Salitre, consolidando un repositorio de información útil para su futura inspección, conservación y salvaguarda.

4.1 Trabajo futuro

Esta investigación sienta las bases para transferir la metodología propuesta a otras edificaciones históricas o de alto valor patrimonial. La incorporación de técnicas de captura tridimensional de mayor precisión —como los sistemas de posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) o sensores LiDAR— junto con niveles de desarrollo BIM avanzados, puede extenderse a diversos casos de estudio del ámbito local e internacional, proporcionando una herramienta integral para la conservación y restauración del patrimonio construido.

Tabla 8. *Actividades desarrolladas durante la reconstrucción tridimensional del Coliseo El Salitre*

Actividad	Tiempo aproximado
Planificación del levantamiento fotogramétrico	4 horas
Captura de imágenes mediante UAV	1 día
Procesamiento fotogramétrico y generación de nube de puntos	2 días
Validación geométrica mediante estación total	1 día
Modelado BIM LOD 200 a partir de la nube de puntos	2 semanas
Verificación y ajustes finales del modelo	2 días
Tiempo total aproximado	3 semanas

En lo relativo a la evolución del modelo digital, los trabajos futuros podrán centrarse en el incremento progresivo del Nivel de Desarrollo (*Level of Development*, LOD). La estructuración en LOD 200 adoptada en este estudio constituye una fase inicial orientada a la caracterización volumétrica del activo, sirviendo como base para su posterior migración hacia esquemas de modelado de información del patrimonio histórico (*Heritage Building Information Modeling*, HBIM). A partir de este hito, se plantea avanzar hacia niveles de definición superiores (LOD 300 o LOD 400), con el propósito de optimizar la planificación, el diagnóstico patológico de detalle y la ejecución de intervenciones constructivas sobre la envolvente y la estructura del Coliseo El Salitre. Asimismo, la definición formal de acciones correctivas específicas deberá complementarse con inspecciones físicas in situ por parte de especialistas, así como con la futura prospección y levantamiento fotogramétrico de los espacios interiores del escenario.

Finalmente, como línea de investigación emergente, se propone la integración de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y visión por computador. A medida que se consoliden bases de datos fotogramétricas de bienes culturales, el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo (*deep learning*) permitirá la detección y segmentación automatizada de patologías visibles —tales como fisuras, eflorescencias y desprendimientos— directamente sobre las imágenes capturadas por los UAV o sobre la nube de puntos tridimensional.

Tabla 9. Comparación cualitativa entre metodologías de documentación arquitectónica

Aspecto	Levantamiento convencional	Flujo UAV-Fotogrametría-BIM
Cobertura geométrica	Parcial y dependiente del acceso físico	Cobertura completa de fachadas y cubierta
Trabajo de campo	Elevado	Reducido
Captura de documentación fotográfica	Actividad independiente	Integrada al vuelo fotogramétrico
Seguridad operacional	Exposición directa a zonas de difícil acceso	Menor exposición del personal
Registro permanente de la geometría	Limitado	Nube de puntos tridimensional georreferenciada
Actualización futura del modelo	Requiere nuevas campañas de medición	Puede realizarse a partir de nuevos vuelos
Integración BIM	Generalmente manual	Compatible con flujos Scan-to-BIM

5. Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado como parte del proyecto de investigación científica INV_ING_3785 financiado por Vicerrectoría de Investigaciones. Los autores agradecen a los profesores Felipe Riaño, Luz Piedad Gallego Osorio y Zully Alexandra Palomeque Sánchez del Programa de Ingeniería Civil de la UMNG por sus recomendaciones para la finalización de este trabajo.

Referencias

- [1] P. Müller, G. Zeng, P. Wonka, and L. Van Gool, "Image-based procedural modeling of facades," *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, no. 3, pp. 85–es, Jul. 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1276377.1276484>
- [2] J. Xiao, T. Fang, P. Zhao, M. Lhuillier, and L. Quan, "Image-based street-side city modeling," *ACM Trans. Graph.*, vol. 28, no. 5, pp. 1–12, Dec. 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1618452.1618460>
- [3] E. Orthuber and J. Avbelj, "3D building reconstruction from LiDAR point clouds by adaptive dual contouring," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-3/W4, pp. 157–164, Mar. 2015, in *PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS Conference (Volume II-3/W4)*, 25–27 March 2015, Munich, Germany. [Online]. Available: <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/II-3-W4/157/2015/>
- [4] Y. Furukawa and J. Ponce, "Accurate, dense, and robust multiview stereopsis," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 8, pp. 1362–1376, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- [5] V. Barrile, V. Gelsomino, and G. Bilotta, "UAV and computer vision in 3D modeling of cultural heritage in southern Italy," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 225, no. 1, p. 012196, Aug. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012196>

- [6] L. E. Melo and A. Cerón, "3D reconstruction of archaeological contexts using image segmentation and structure from motion," in *2021 XXIII Symposium on Image, Signal Processing and Artificial Vision (STSIVA)*, Sep. 2021, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/STSIVA53688.2021.9592001>
- [7] J. M. R. Troncoso and A. Cerón, "3D reconstruction of cultural heritage pieces using depth sensors," in *2024 XXIV Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA)*, Jul. 2024, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/STSIVA63281.2024.10637858>
- [8] A. Pamart, F. Morlet, L. De Luca, and P. Veron, "A robust and versatile pipeline for automatic photogrammetric-based registration of multimodal cultural heritage documentation," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 12, p. 2051, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/rs12122051>
- [9] P. Moulon, P. Monasse, R. Perrot, and R. Marlet, "OpenMVG: Open multiple view geometry," in *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, Springer, 2016, pp. 60–74. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56414-2_5
- [10] A. Alouache, X. Yao, and Q. Wu, "Creating textured 3D models from image collections using open source software," *International Journal of Computer Applications*, vol. 163, no. 9, pp. 14–19, Apr. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5120/ijca2017913734>
- [11] I. A. Ramos Howell, "Desarrollo de un sistema de reconstrucción 3D a partir de imágenes capturadas por drones," bachelor thesis, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/689090>
- [12] Y. Liu and J. Chen, "Research on the conservation of historical buildings based on digital 3D reconstruction," *Procedia Computer Science*, vol. 228, pp. 593–600, Jan. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.068>
- [13] C. Zhang, F. Wang, Y. Zou, J. Dimyadi, B. H. W. Guo, and L. Hou, "Automated UAV image-to-BIM registration for building façade inspection using improved generalised Hough transform," *Automation in Construction*, vol. 153, p. 104957, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104957>
- [14] C. Pérez Palomino, "Complutum: reconstrucción 3D del foro del yacimiento romano de Alcalá de Henares," Jun. 2022. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/70989/>
- [15] E. L. Carballo-Hernández, L. E. Acosta-González, J. C. Fernández-García, and F. Ojeda-Pardo, "Modelado de edificaciones a partir de nubes de puntos con el uso de Autodesk Revit: e313," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 12, no. 4, Sep. 2021. [Online]. Available: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/813>
- [16] A. Páez-Cuervo, J. D. G. Hernández, and E. S. Upegui, "Fotogrametría SfM como herramienta para la preservación del patrimonio cultural de Bogotá (Colombia): caso de estudio La Rebeca," *UD y la Geomática*, no. 15, 2020.
- [17] L. D. Rodríguez Buitrago, L. D. Pachón Acuña, and E. S. Upegui Cardona, "Virtualización del patrimonio como oportunidad para el turismo: comparación entre software comercial y software libre para la reconstrucción 3D. Estudio de caso Busto Fabio Lozano Simonelli," *RISTI*, Jul. 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/29892>
- [18] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1515/9783110607253>

