

FOTOGRAMETRÍA Y MODELADO 3D PARA EL REGISTRO
DOCUMENTAL DE UN PUENTE PATRIMONIAL

PHOTOGRAMMETRY AND 3D MODELING FOR THE
DOCUMENTARY REGISTRATION OF THE HERITAGE BRIDGE

Laura Lopresti¹
Sergio Gavino¹
Lucas Speroni¹
Gabriel Defranco¹
Laura Fuertes¹

Resumo: Este trabajo relata el relevamiento fotogramétrico y posterior reconstrucción de un modelo tridimensional del Puente D. Gerardi ubicado en la localidad de M. B. Gonnet, La Plata, Argentina. Este puente, primera obra de hormigón armado en Argentina, fue construido por el ingeniero Gerardi en 1916 y a partir de 2018 integra el patrimonio histórico y cultural del municipio. Para el relevamiento, se empleó una técnica fotogramétrica de bajo costo y en la reconstrucción digital se incorporaron técnicas de modelado 3D a través de un software paramétrico. Las acciones relatadas tienen como propósito la obtención de un modelo digital que permita, a posteriori, acciones para la difusión de este patrimonio.

Palavras-chave: puente, fotogrametria, patrimonio histórico-cultural, modelo 3D.

Abstract: This article focuses on the photogrammetric survey and subsequent reconstruction of a three-dimensional model of the D. Gerardi Bridge (town M. B. Gonnet, La Plata, Argentina). This bridge, the first reinforced concrete work in Argentina, was built by engineer Gerardi in 1916 and since 2018 it has been part of the historical and cultural heritage of the municipality. For the survey, a low-cost photogrammetric technique was used and 3D modeling techniques were incorporated into the digital reconstruction through parametric software. The purpose of the actions reported is to obtain a digital model that allows, subsequently, actions to disseminate this heritage.

Keywords: bridge, photogrammetry, historical-cultural heritage, 3D modeling.

¹ UIDET GIGA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. laura.lopresti@ing.unlp.edu.ar; sergio.gavino@ing.unlp.edu.ar; lucas.speroni@ing.unlp.edu.ar; ghdefran@ing.unlp.edu.ar; lfuertes@ing.unlp.edu.ar.

1 Introducción

El puente Gerardi se encuentra en el kilómetro 4,425² de la actual Ruta Provincial N° 1, también conocida como Camino General Belgrano, que conecta la ciudad de La Plata con la ciudad de Buenos Aires. Inicialmente, fue diseñado para atravesar la ruta del ferrocarril La Plata - Brandsen, en lo que constituía el "Camino afirmado La Plata-Avellaneda". Actualmente, debido al levantamiento de las vías, no solo se utiliza para su función original, sino que también sirve como conexión por debajo para una importante avenida de la ciudad (Av. 19), siguiendo una trayectoria sinuosa.

En el año 2018, el Puente Donato Gerardi fue declarado de interés municipal, reconociéndoselo como parte del Patrimonio histórico y cultural del partido de La Plata mediante el decreto N° 25 del Concejo Deliberante de la ciudad de La Plata. Como parte de las diversas iniciativas destinadas a difundir esta obra, se llevó a cabo una conferencia impartida por el Ingeniero Luis Lima, ex rector de la Universidad Nacional de La Plata, titulada "Puente Donato Gerardi: un puente patrimonial de hormigón armado al servicio durante 90 años". Además, el arquitecto Enrique Ferrari, especializado en puentes, organizó una exposición fotográfica titulada "Puentes de la Región" y actualmente ha presentado un proyecto de ley en la Legislatura de la provincia de Buenos Aires para que se declare esta obra como "Monumento Histórico Provincial".

Originalmente este puente fue encargado a una empresa de origen belga y diseñado para ser construido en metal. Sin embargo, debido al contexto de la guerra en Europa en el año 1914, el material previsto escaseaba ya que se consideraba estratégico, lo que resultó en un aumento de precios para nuestro país. Ante esta situación la Dirección de Hidráulica, Puentes y Caminos solicitó al Ingeniero Civil Donato Gerardi el diseño de un puente en arco de "cemento armado"³ (GERARDI, 1916). La construcción tuvo lugar entre los meses de octubre de 1915 y mayo de 1916, cumpliendo con los plazos estipulados y dentro del presupuesto asignado.

El Ingeniero Donato Gerardi (1886-1962) era de origen italiano y se graduó en 1910 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (Figura 1). Trabajó en la Dirección de Hidráulica, Puentes y Caminos del Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires, donde eventualmente ocupó el cargo de director. Simultáneamente, ejerció como docente en la actual Facultad de Ingeniería, antes conocida como Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, de la Universidad Nacional de

² Expresado en el Sistema métrico legal argentino (SIMELA).

³ Se ha empleado la expresión original tal como aparece en el material relevado.

La Plata (UNLP), donde desarrolló su labor como profesor en las materias de Caminos y, posteriormente, de Ensayo de Materiales.



Figura 1 – Ing. Donato Gerardi. Fuente: imagen de uso público

Donato Gerardi estuvo a cargo del proyecto de construcción del puente, y su contribución quedó plasmada en las memorias de la obra recopiladas en el libro titulado "Camino Afirmado de la Plata a Avellaneda" (GERARDI, 1916). Además, fue el primer presidente del Consejo Profesional de la Ingeniería. En 2008, fue declarado ciudadano ilustre por la ciudad de La Plata.

A raíz de su fallecimiento, quienes supieron compartir días de trabajo con Gerardi han plasmado su sentir en la revista de Vialidad N°20.

La vialidad argentina pierde con el ingeniero Gerardi una figura señera de sus comienzos, un precursor que afianzó el nacimiento vial con la construcción (1912-1916) del primer camino de largo aviento del país, la Ruta Nacional N°1, camino General Belgrano, entre La Plata y Avellaneda, para cuyo planeamiento y ejecución fue llamado, afrontando la responsabilidad de fiscalización del trazado y la proyección de costosas obras de arte. Vialidad (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 1962)

Dada la importancia de este bien patrimonial, se ha tomado la decisión de emprender acciones para difundir tanto la obra como la figura de su ejecutor. De este modo, se ha comenzado esta tarea iniciando la búsqueda de documentación relacionada con la obra, con el propósito de crear un modelo 3D y eventualmente publicarlo en un repositorio virtual⁴. La técnica de relevamiento seleccionada para este

⁴ Será publicado en el repositorio de la UNLP actualmente se está implementando.
<https://datos.unlp.edu.ar>

proyecto es la de fotogrametría de bajo costo, específicamente asociada con la técnica de *Structure from Motion* (SfM), una metodología eficiente que utiliza fotografías para generar datos tridimensionales. Tras la captura de las imágenes, se realiza el procesamiento fotogramétrico a través de software específico. Durante esta fase, se emplean algoritmos y técnicas avanzadas para analizar y correlacionar las imágenes dando como resultado la creación de un modelo digital que se convierte en una representación tridimensional, y constituye una representación virtual del objeto real relevado. Aunque la precisión métrica ha sido difícil de determinar, este método permite un modelado parcial suficientemente proporcionado del puente.

A través de la recopilación de información técnica detallada sobre la estructura, como dimensiones, formas y detalles arquitectónicos, se enriquece el modelo 3D para reflejar con mayor precisión las características del puente. Este proceso integral, desde la captura de las imágenes hasta la construcción del modelo 3D, contribuye a preservar digitalmente este patrimonio cultural y facilita su difusión, estudio y aprecio por parte de la comunidad.

Este trabajo forma parte del Proyecto PID UNLP 11/I274 *Técnicas de relevamiento de bajo costo, modelado paramétrico e impresión 3D para la producción de modelos digitales y materiales. Aplicaciones en el patrimonio cultural material, en ingeniería inversa y en la enseñanza de los sistemas de representación.*

2 El Puente Donato Gerardi

El proyecto original consideraba una longitud de 32 m con una estructura metálica con vigas principales de tipo parabólico. Este diseño prescindía de contraventamientos superiores y contaba con montantes reforzados.

Según la información proporcionada previamente Gerardi llevó a cabo una reproyección de la estructura del puente para adaptarse al cambio de material. De esta manera, la estructura de hormigón armado resultante adopta la forma de un arco de circunferencia cuyo eje tiene un ángulo de $72^{\circ} 08'$ con el eje del camino (oblicuo). Se trata de un puente triarticulado con un tablero superior, presentando una luz entre los apoyos de 27,50 m y una flecha de 3,10 m (Figura 2). El ancho total del puente es de 6 m, coincidiendo con la amplitud del camino, y cuenta con veredas de 1 m a cada lado. Estas veredas están delimitadas por una baranda de hormigón armado con aberturas que contribuyen a reducir el peso de la estructura. La altura total entre las vías del ferrocarril (actualmente en desuso) y la parte inferior (intradós) del arco del puente es de 5,50 m.

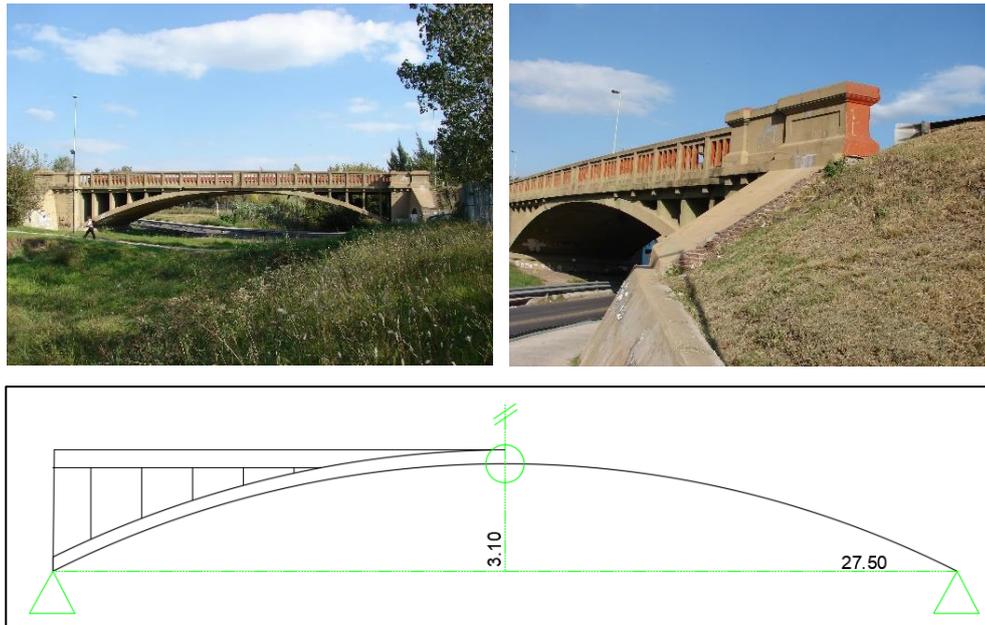


Figura 2 – Imágenes del puente y esquema de arco triarticulado con dimensiones generales. Fuente: de los autores

El perfil de la calzada es horizontal en la dirección transversal y presenta una inclinación del 1% en la dirección longitudinal (GERARDI, 1916).

Actualmente el mantenimiento del puente se ve dificultado por el establecimiento de personas en situación de calle quienes han intervenido la estructura cerrando los espacios entre las columnas, como se puede apreciar en las imágenes capturadas en el 2018 y 2019 que se encuentran en Google Street View⁵. También ha sufrido en el año 2021 el embestimiento de un camión que produjo un daño menor sobre el arco.

El último relevamiento del estado del puente, realizado en 2011 por Traversa, indicó que la estructura se encontraba en un estado de deterioro clasificado como Nivel B (NEGRELLI y otros, 2011). Este nivel se asigna debido a la presencia de manchas de óxido y fisuras con un espesor inferior a 0,4 mm, según la catalogación del *Comité Euro-Internacional du Béton*. Un relevamiento anterior (LIMA, 2006) ya señalaba la presencia de este estado de deterioro, detallando que la armadura del intradós mostraba una corrosión generalizada, aunque no se había detectado una reducción significativa en la sección de las barras estructurales que pudiera afectar la estabilidad del puente. Además, este estudio concluyó que la resistencia del material utilizado considerando los estándares de seguridad actuales para la construcción de puentes y su sobrecarga de funcionamiento es suficiente para asegurar su integridad estructural.

⁵ Ubicación -34.892573, -58.006954

Como se ha señalado en Lima (2006) y en Observatorio de Patrimonio y Paisaje (2016) este puente tiene valor Cultural, transformándose en la herencia de generaciones pasadas a generaciones futuras siendo una pieza única actualmente en uso; histórico, porque indica el desarrollo de un país en un contexto económico y político; económico, porque ha permitido darle valor a la zona donde se circunscribe conectando arterias importantes de la ciudad. Además de poseer valor arquitectónico, ambiental y de identidad.

3 Revisión de la literatura

En el año 2009 se inicia el proyecto denominado *World Digital Library*⁶. Es una acción de la Biblioteca del Congreso de EE. UU., con el apoyo de la UNESCO y con contribuciones de bibliotecas, museos, instituciones educativas y organizaciones internacionales de todo el mundo. Este proyecto busca preservar y compartir algunos de los documentos culturales más relevantes a nivel global, permitiendo el acceso a personas de todo el mundo.

En la misma línea de difusión del patrimonio se encuentra el Proyecto *Google Arts & Culture*⁷, iniciado en el año 2011, que reúne imágenes de alta resolución de las obras más significativas de los mejores museos del mundo y utiliza la misma tecnología que está detrás de Google Street View[®].

Otro proyecto, más actual, es el llamado *Time Machine*⁸, el cual tiene como objetivo establecer un sistema de información digital colaborativo para trazar la evolución económica, social, cultural y geográfica de Europa a lo largo de la historia. En este enfoque, la digitalización se considera como el primer paso esencial.

Un proyecto que combina la digitalización con la realidad virtual es el llamado *Arc/k*⁹. Este grupo busca preservar digitalmente el patrimonio cultural en 3D y adoptar la realidad virtual y aumentada para crear entornos educativos, académicos y para el público en general.

En este proceso de digitalización y representación gráfica bidimensional y tridimensional del patrimonio cultural de cada una de estas líneas de acción se exploran diversos escenarios, modos, técnicas y formatos. Se puede llevar a cabo con costosos equipos de láser escáner, que permiten relevar la información tridimensional de gran

⁶ <https://www.loc.gov/>

⁷ <https://artsandculture.google.com/>

⁸ <https://www.timemachine.eu/>

⁹ <https://arck-project.org/>

escala o piezas muy pequeñas con alta precisión dimensional (BARBA, 2010), o utilizar la fotogrametría que establece un rango de costos accesibles para la mayoría de los laboratorios y grupos de trabajo.

Gracias a una investigación consolidada y a la exploración de diversas aplicaciones, la fotogrametría puede generar modelos de superficies 3D texturizados con alta precisión mediante la utilización de imágenes, obtenidas desde distintos puntos de vista, con suficientes superposiciones (ZHAN 2021). Actualmente la fotogrametría colabora con otras técnicas para lograr productos digitales más eficientes (FIORILLO, 2013; CHARRA, 2019, MORENA y otros, 2020). Esta integración de datos aprovecha lo mejor de cada técnica para establecer un flujo de trabajo que demande menos costos económicos y de tiempo.

Una técnica que complementa la fotogrametría, otorgándole mayor robustez, es la denominada *Structure from motion* (SfM), perteneciente a la disciplina de la visión artificial, que utiliza múltiples imágenes superpuestas para crear un modelo tridimensional del área registrada en las fotografías. El proceso se inicia con un par de imágenes con muchos detalles y con los datos EXIF¹⁰. Se analizan los parámetros intrínsecos en esos datos (distancia focal, punto principal) y se estiman los parámetros extrínsecos usando un algoritmo *ad hoc*. Una vez que se han identificado múltiples características en muchas imágenes (que deben tener superposición de información en ellas), se resuelve la posición X, Y y Z de los puntos característicos y se reconstruye la nube de puntos. En el último paso, se realiza la triangulación (malla) y la textura que permiten crear un modelo más realista utilizando la información de las fotografías. No se recomienda utilizar zoom en la captura de las fotografías (SANZ-ABLONEDO y otros, 2012), ya que puede causar dificultades en el reconocimiento de los puntos. Es conveniente capturar conjuntos de imágenes multiescala que abarquen todo el sitio con unos pocos fotogramas antes de acercarse para obtener imágenes más detalladas. (MICHELETTI y otros, 2015). Es importante mencionar que la iluminación tiene un papel clave en la adquisición de las fotografías y se debe evitar la presencia de sombras (LEON LESCANO y otros, 2020).

La SfM ha impactado en el campo de la fotogrametría permitiendo reducir los costos de los equipos involucrados en el relevamiento digital y las escalas de lo relevado. Los resultados demuestran ser confiables tanto para grandes escalas como para piezas de pequeñas escalas como se evidencian en diversos trabajos científicos desarrollados

¹⁰ Los datos EXIF son parámetros intrínsecos de cada imagen digital otorgados por la cámara fotográfica como la distancia focal, ISO, fecha y día, etc.

(CHAVEN CARRA y otros, 2019) (ANTINOZZI y otros, 2020). Cabe mencionar que en algunas ocasiones los datos tridimensionales son insuficientes para la visualización del bien patrimonial y para lograr una representación más adecuada, o para utilizarla como herramienta de estudio del bien patrimonial, es que se recurre al modelado 3D (FUERTES y otros, 2021). Para llevar a cabo esto se utilizan diversas técnicas como el reconocimiento de volumetrías, que se puede realizar automáticamente con algunos software *ad hoc* (DEFRANCO y otros, 2017) hasta un trabajo más minucioso realizado manualmente que consiste en trazar líneas, ejes, puntos y planos que cortan el modelo tridimensional y permiten recabar información para el proceso de modelado (ANTINOZZI y otros, 2020). También se puede extraer información de los recursos llamados ortofotos que son imágenes geoméricamente corregidas para quitar las deformaciones que sufren las fotografías dadas por la lente fotográfica.

4 Materiales y métodos

Para llevar a cabo este trabajo se ha utilizado una cámara digital Sony® DSC-H2 de 6 megapíxeles y un trípode.

En cuanto a los equipos informáticos necesarios para los trabajos de laboratorio, se empleó una computadora con procesador Intel® Core i3 y 2 GB de RAM. Posteriormente se retoma el trabajo en el año 2015, realizando el procesamiento en una máquina virtual Microsoft Azure® de alto rendimiento (Serie NV6) con 6 núcleos E5-2690v3 en la nube, y finalmente, en el año 2023, en una computadora con procesador Intel® Core i5 y 16 GB de RAM.

Para el procesamiento fotogramétrico y la obtención de ortofotos, se utilizó Agisoft Metashape®. En cuanto al modelado 3D y la extracción de información del modelo de malla fotogramétrica, se empleó el software Autodesk Inventor® 2020.

Para la extracción de algunas dimensiones, se analizó el libro de obra mencionado anteriormente, que relata la construcción del puente, los materiales y costos involucrados, así como las pruebas de deformación del arco del puente. Este libro cuenta con 58 láminas que incluyen imágenes de los planos de la obra. Para este trabajo se consultaron las siguientes láminas:

- Elevación y longitudinal del puente
- Planta y corte transversal del puente
- Corte longitudinal y transversal de la bóveda
- Media planta del semiarco

El trabajo se ha organizado en dos partes: una de campo, donde se realizaron las capturas de fotografías, y otra de laboratorio, donde se llevó a cabo el procesamiento fotogramétrico y la generación del modelo 3D.

En la Figura 3 se muestra el flujo de trabajo para el presente proyecto.

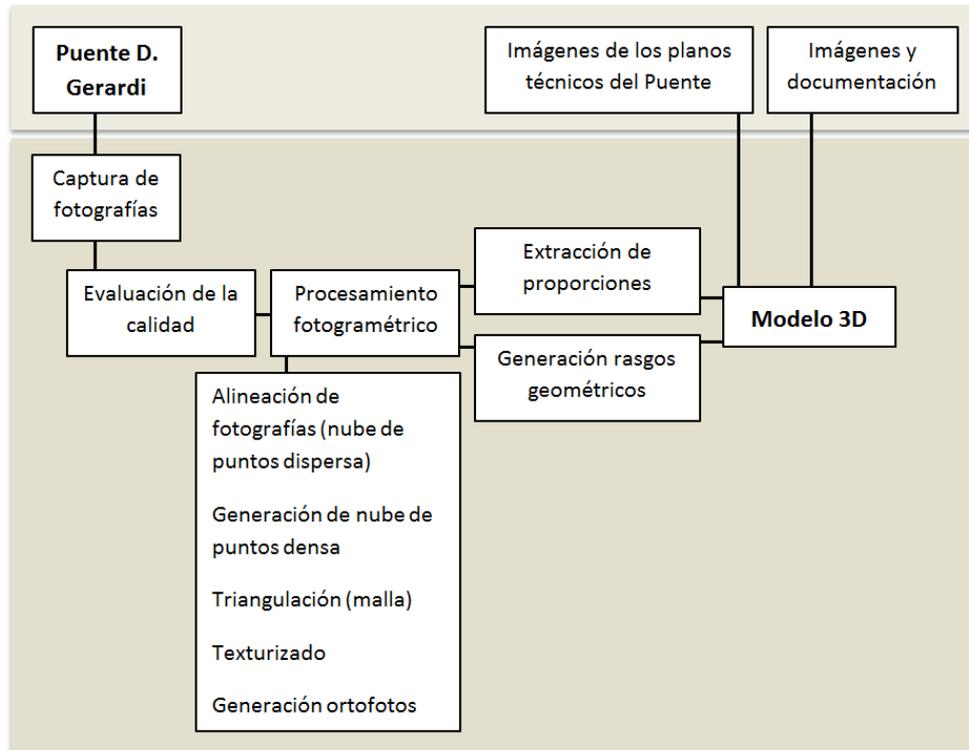


Figura 3 – Flujo de trabajo para el relevamiento y modelado. Fuente: de los autores

4.1 Fotografías

Se realizaron un total de 94 capturas fotográficas con una resolución de 2816 x 1120 píxeles. Durante una primera inspección visual, se identificó la presencia de personas en la escena, estas fotografías fueron excluidas del procesamiento fotogramétrico.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de los niveles de exposición para evaluar su posible influencia en el procesamiento fotogramétrico. Aunque esta evaluación se realizó durante la captura de las fotografías, no fue controlada de manera óptima debido a la variación de la luz ambiental y las sombras generadas por el puente en cada toma. Por lo tanto, fue necesario revisar esto nuevamente en el laboratorio. Este análisis reveló la presencia de una marcada concentración de píxeles con luz en algunas fotografías, dejando sobreexpuestas ciertas zonas. Las fotos sobreexpuestas que contenían áreas con partes del puente y que no pudieron ser regeneradas se excluyeron del proceso.

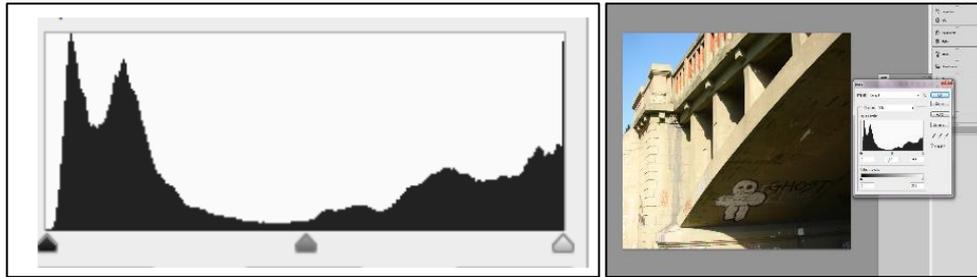


Figura 4 – Ejemplo de histograma y fotografía analizada. Fuente: de los autores

A modo de ejemplo, la Figura 4 presenta el histograma de una de estas fotografías, mostrando la cantidad de píxeles y sus valores de luminosidad. La polarización hacia la izquierda y la derecha del gráfico indica una distribución deficiente de los píxeles, relacionada con el contraste, el brillo y la distribución del color, lo cual podría afectar negativamente el reconocimiento de puntos claves en el procesamiento. Aunque la intervención digital podría compensar este problema, las comprobaciones concluidas en Moon y otros (2017) indican que esta estrategia puede ser poco adecuada para la escala civil. Por lo tanto, no se recomienda su aplicación.

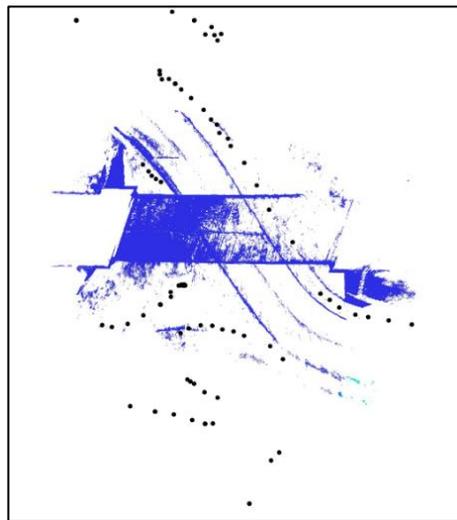


Figura 5 – Posición de las capturas fotográficas. Fuente: informe generado por el software Agisoft

En una segunda fase, se lleva a cabo la estimación de la calidad de las fotografías considerando su nitidez con el software Agisoft Metashape®. Los valores obtenidos revelan un índice, en la parte más enfocada de la imagen, superior a 0.7, con excepción de una imagen que arroja un valor de 0.5. Por lo tanto, se decide descartar esta imagen siguiendo la recomendación del propietario del software (AGISOFT, 2023).

Con base en estas consideraciones, se eliminaron un total de 6 fotografías, y el proceso de análisis y modelado se inicia con las restantes 88 fotografías.

En la Figura 5 se puede observar cómo se ha realizado la captura de las fotografías que, debido a las condiciones del terreno y el uso actual del puente, no ha permitido establecer los anillos recomendados para este tipo de relevamiento.

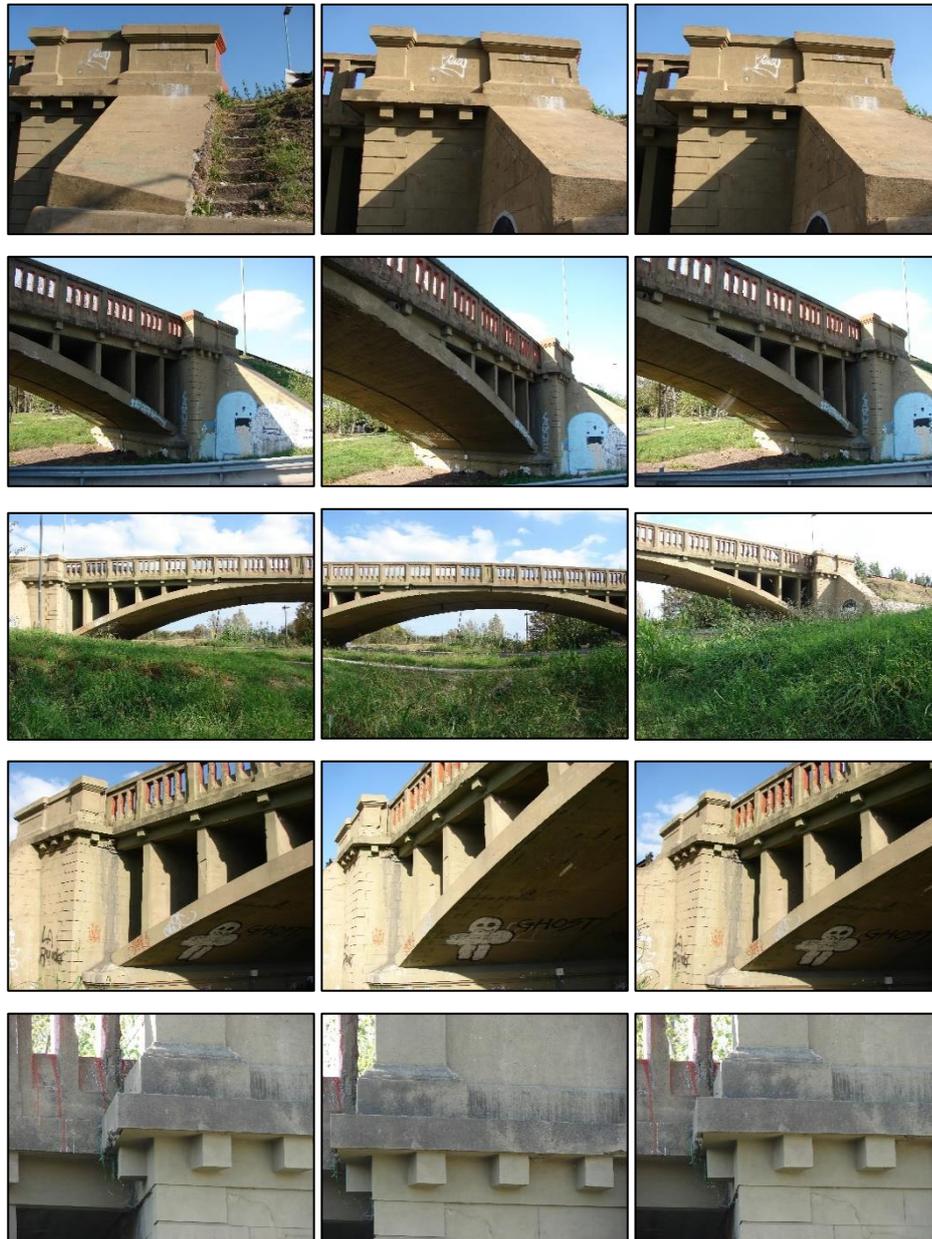


Figura 6 – Algunas de las fotografías utilizadas en el proceso. Fuente: de los autores

En la Figura 6, teniendo en cuenta esta distribución de capturas fotográficas, y a modo de ejemplo, se muestran algunas de las partes relevadas.¹¹

4.2 Desarrollo del procesamiento fotogramétrico

El proceso comienza con la importación de las fotografías en el software de fotogrametría Agisoft Metashape®, y se realiza el procesamiento teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 1 - Tabla que resume los parámetros

Proceso	Resultados / tiempo procesamiento	Parámetros
Nube de puntos dispersa	35.000 puntos / ≈ 2 min	<i>High, Generic preselection, Reference, Adaptive camera, Guided image matching. 1000 key point limit, 4000 tie point limit.</i>
Nube de puntos densa	≈ 864.000 puntos / ≈ 22 min	<i>High, Mild, Calculated point color, Calculated point confidence.</i>
Malla	≈1.930.000 faces / ≈ 6 min	<i>Dense cloud, High, Arbitrary, Interpolation enable.</i>
Texturizado	8000 texture size / ≈ 3 min	<i>Diffuse map, Generic, Mosaic, Ghosting filter, Hole filling.</i>

Fuente: de los autores



Figura 7 – Modelo fotogramétrico del Puente. Fuente: de los autores

¹¹ La totalidad de las fotografías se encontrarán alojadas en el repositorio de la UNLP mencionado anteriormente.

Se ha configurado la nube de puntos dispersa con parámetros específicamente seleccionados para garantizar una alta precisión en la estimación de la posición de la cámara. Se han establecido límites, por prueba y error, en el número de puntos claves por imagen y en la cantidad total de puntos de enlace. Además, se ha habilitado el emparejamiento de imágenes guía para mejorar la detección en presencia de vegetación. La generación de la nube de puntos densa se realiza con una configuración de alta calidad, (Mild) para incorporar detalles de menor escala. La reconstrucción de la malla y la texturización se realizan con parámetros específicos para obtener un modelo tridimensional preciso y detallado (Figura 7).

4.3 Modelado 3D

Para llevar a cabo el modelado 3D, se extrajo información geométrica, las proporciones y los ángulos del modelo de malla fotogramétrico. Esta información se obtuvo mediante la intervención del modelo de malla mediante líneas y planos, tanto sea dibujando sobre el modelo de malla o intersectando con planos que al seccionar el modelo, generan contornos, como se observa en la Figura 8.

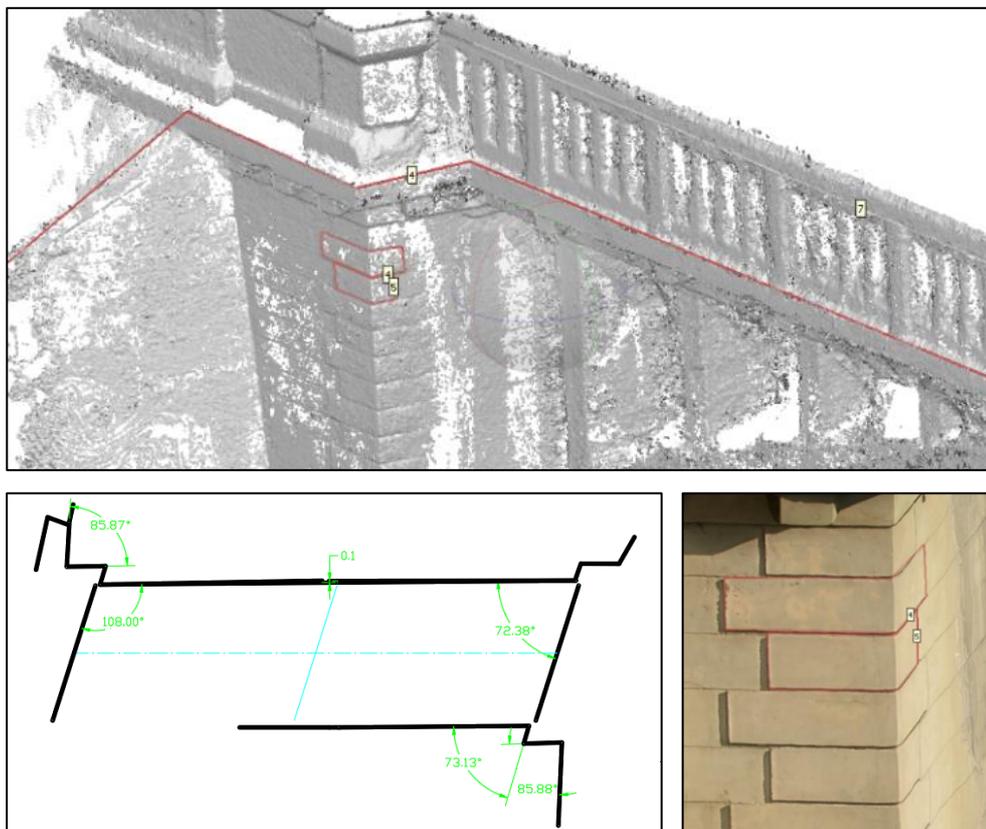


Figura 8 – Extracción de datos geométricos de la malla del modelo fotogramétrico. Fuente: de los autores

Además, fueron consideradas las medidas que estaban presente en las imágenes de los planos técnicos como así también los ejes constructivos allí planteados. Para poder iniciar el modelado ha sido necesario plantear una referencia. Para ello se han analizado las diferentes distancias de profundidad de los planos verticales del puente y se ha considerado como plano cero el plano vertical, visto de frente, apoyado sobre el arco principal, como lo indica la Figura 9.

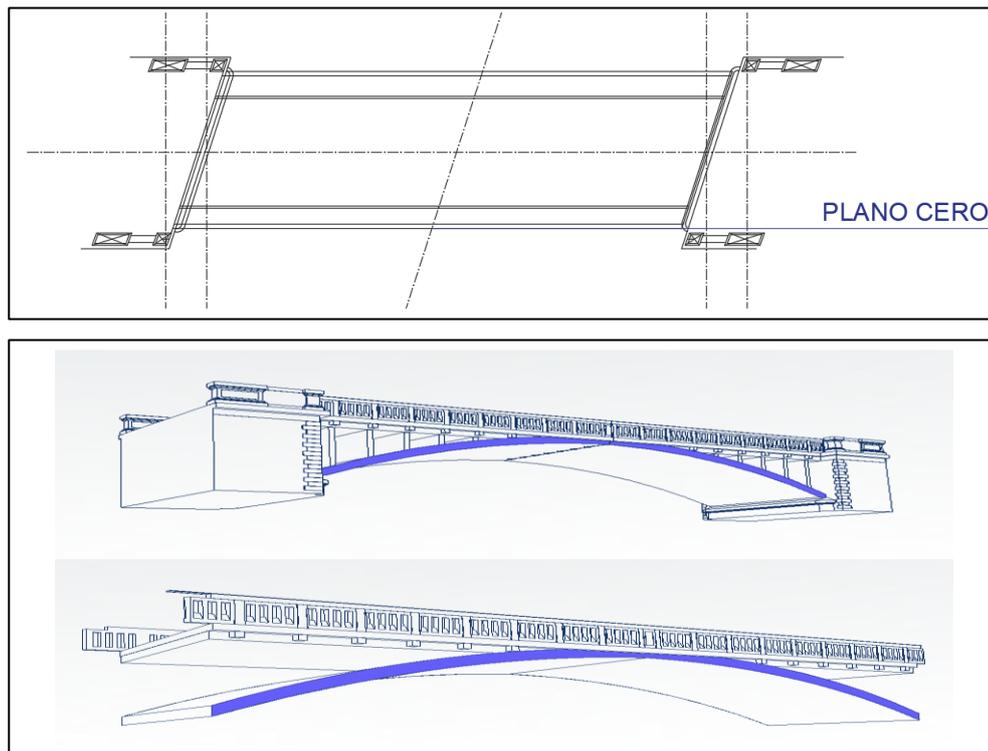


Figura 9 – Zona de apoyo del plano cero. Fuente: de los autores

En el software de modelado, Autodesk Inventor[®], se ha creado parte por parte el puente en un único modelo. El proceso de modelado comenzó con la generación de los volúmenes centrales, como el arco, el tablero, las columnas y las zonas que conectan un lado del puente con el otro. Posteriormente, se llevaron a cabo los detalles, como las barandas, los apliques, etc., en un lateral para luego replicarlo con simetría central en el otro lado (Figura 10). Este enfoque se adoptó debido a que, al tratarse de un puente oblicuo, no fue posible utilizar la simetría axial ni la copia.

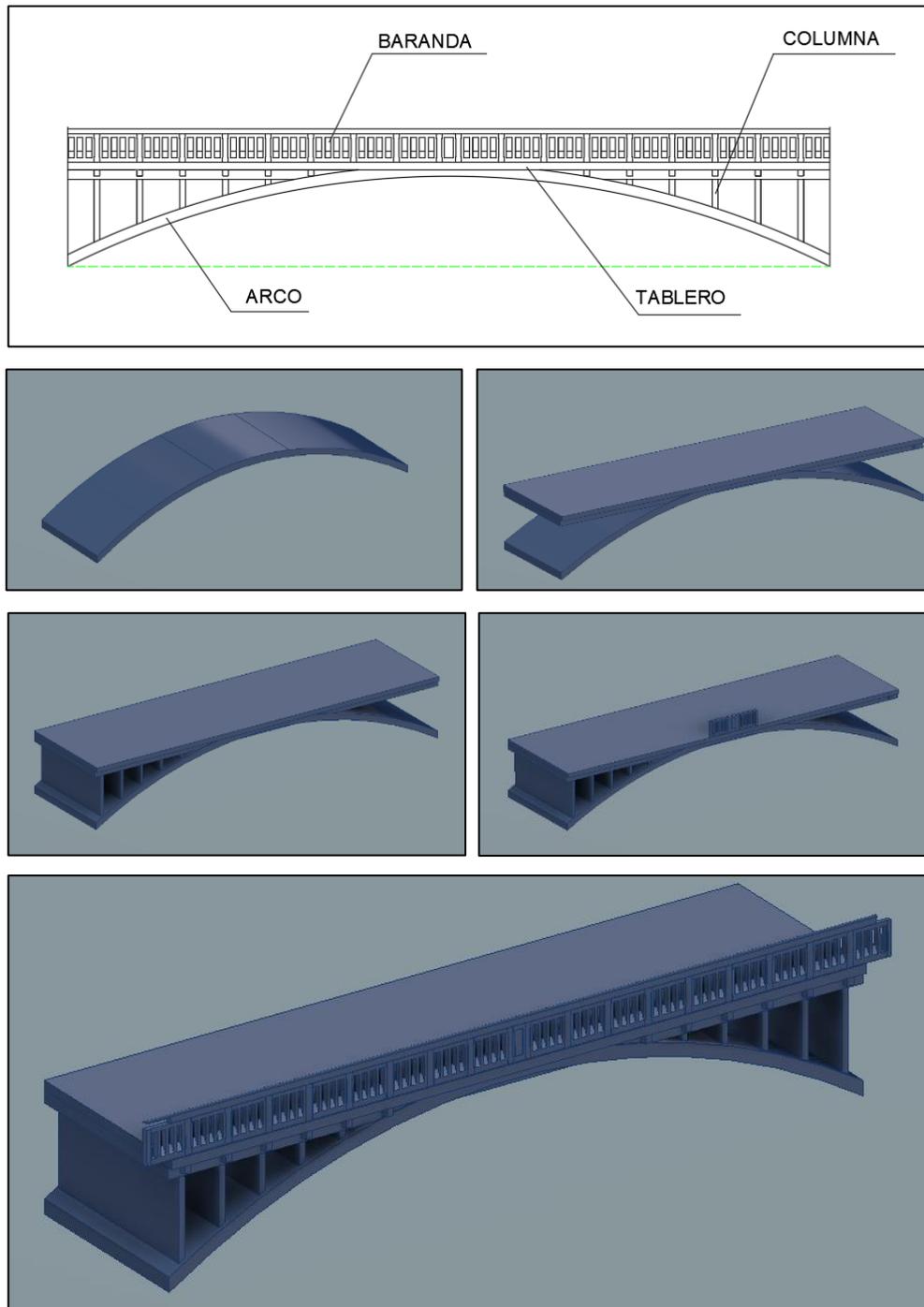


Figura 10 – Proceso de modelado 3D. Fuente: de los autores

En las esquinas (Figura 11) se han creado las columnas que delimitan el final del puente. Se han modelado dos de las esquinas y luego se han copiado también con simetría central.

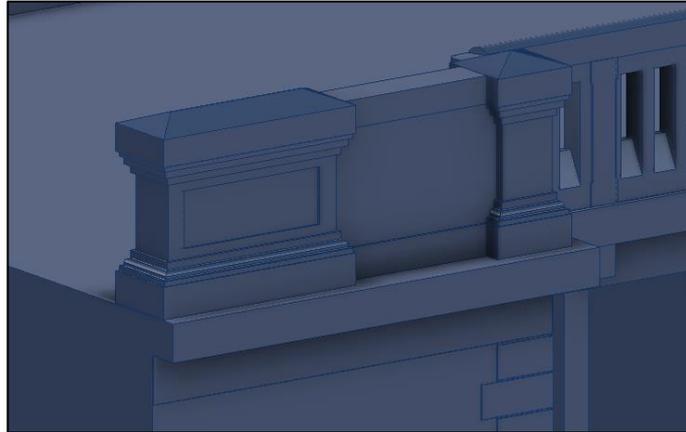


Figura 11 – Detalle de las columnas que coronan el final del puente. Fuente: de los autores

Para dar la oblicuidad del arco principal y de las demás partes del puente se ha empleado el comando de barrido (*Sweep*).

Para la baranda, se ha utilizado extrusión (*Extrude*), considerando las operaciones booleanas de suma y resta. Se ha construido la parte central y luego el módulo lateral (Figura 12) compuesto por las columnas de la baranda más las columnas principales. Luego se replica mediante copia matriz (*Array*) y, una vez finalizado un lado, se realizó una copia espejo del lado derecho utilizando el comando de copia espejo axial (*Mirror*). Este comando permite tener una parte "original" que, si se modifica, también cambiará la copia espejo. Esta herramienta resulta útil para lograr una creación geométrica más coherente.

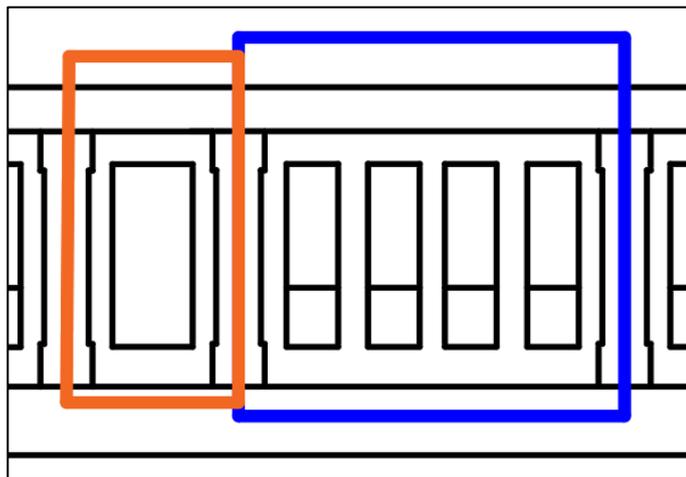


Figura 12 – En naranja la parte central de la baranda, en azul el módulo que se replica.
Fuente: de los autores

En los pasos sucesivos, se construyeron los detalles, como la abertura para la dilatación del puente, los soportes o apoyos y los ladrillos (Figura 13) en las esquinas de los muros (estos fueron realizados también modularmente).

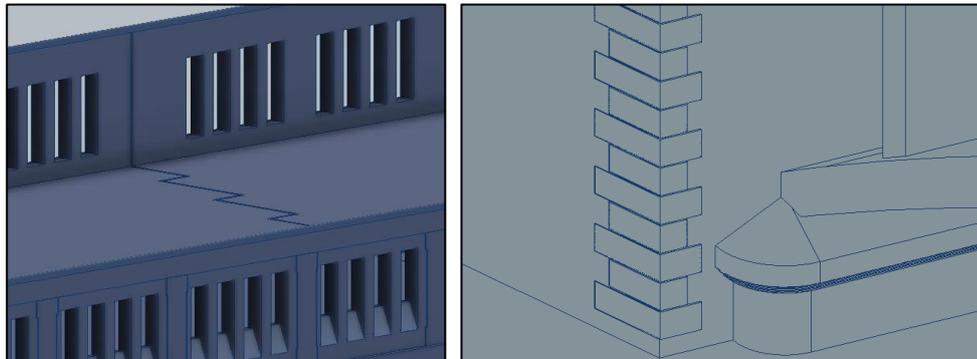


Figura 13 – Detalles de modelado. Fuente: de los autores

5 Resultados

Se ha obtenido un modelo digital tridimensional de la obra. Las dimensiones fueron extraídas de las imágenes de los planos técnicos, aunque se encontraron dificultades en la lectura de estas dimensiones debido a la baja resolución de las imágenes. Además, los planos son de carácter constructivo, y varias de las dimensiones necesarias para el modelado no estaban presentes. Cabe mencionar que los ángulos extraídos del modelo de malla, si bien no podemos hablar de precisión dimensional, están muy cercanos a los valores estipulados en el plano técnico. El ángulo principal que le otorga la condición de oblicuidad de $72^{\circ} 08'$ fue de $72^{\circ} 38'$.

Durante el trabajo, la disponibilidad de equipos informáticos fue cambiando y eso ha permitido explorar diversas estrategias de procesamiento fotogramétrico, principalmente porque trabajar con muchas fotografías no era conveniente por la capacidad de procesamiento de las computadoras. De esta manera es que se realizaron pruebas alternativas de procesamiento fotogramétrico por lotes (menor cantidad de fotografías seleccionadas por zonas del puente) y en un único lote. Como resultado, se observaron mejoras en el procesamiento de todas las fotografías en un solo lote en comparación con el procesamiento de las fotografías por separado. Sin embargo, la generación del modelo a través del procesamiento por lotes no logró preservar fielmente la configuración original de la estructura, presentando ciertos desvíos y deformaciones. En consecuencia, abordar la corrección de estos inconvenientes supondría un trabajo considerable y detallado para restaurar la precisión y fidelidad del modelo tridimensional.

En la Figura 14 y Figura 15 se muestran imágenes en perspectivas del modelo 3D y dos vistas proyectadas según el método de Monge (ISO E).

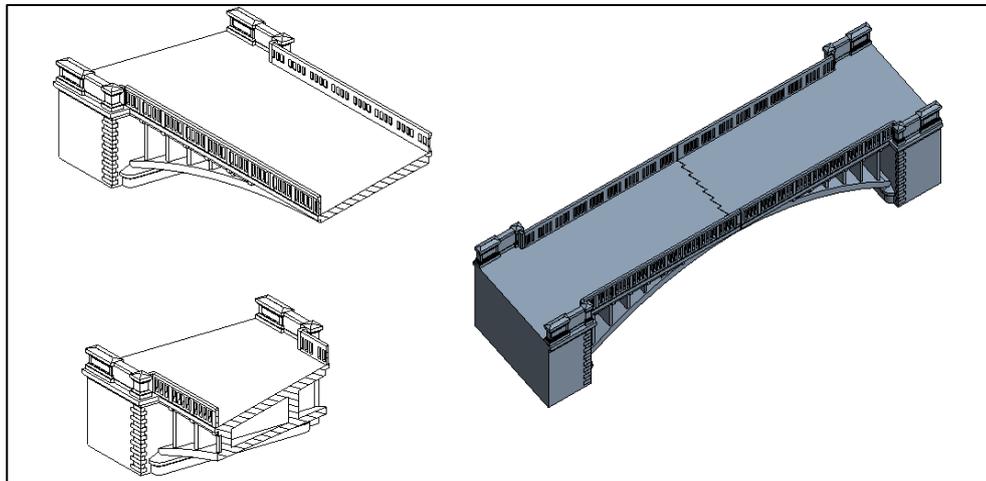


Figura 14 – Modelo 3D del Puente. Fuente: de los autores

Es importante señalar que disponer del modelo fotogramétrico, mientras se realiza el modelado, ha permitido analizar y explorar de una manera dinámica las posibilidades constructivas del mismo y así determinar la lógica que se ha utilizado en el procedimiento de modelado tridimensional en el laboratorio. Los muros de contención no fueron modelados en esta instancia debido a la necesidad de recopilar información geométrica adicional para poder llevarlo a cabo.

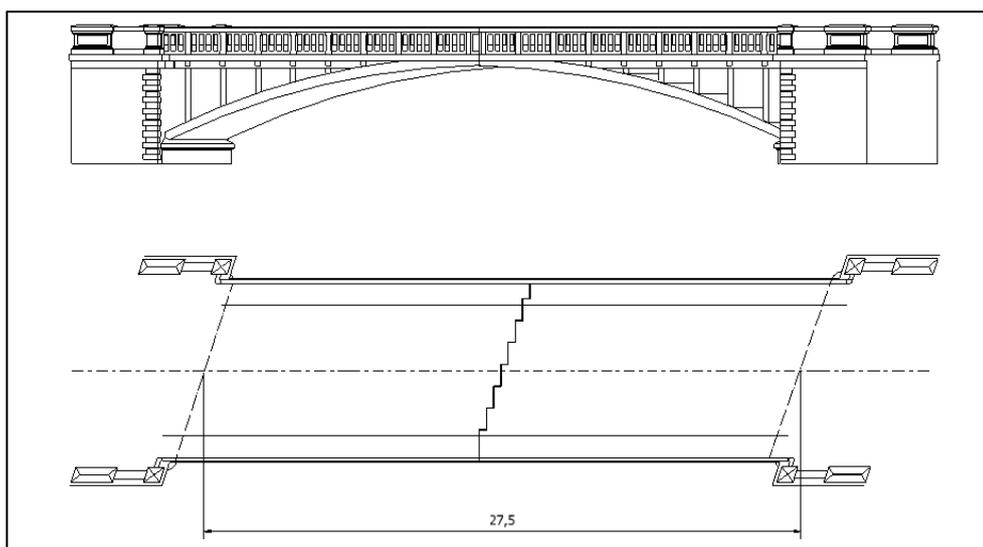


Figura 15 – Vista anterior y vista superior del puente en Sistema Monge Iso E. Fuente: de los autores

6 Conclusiones

En esta primera aproximación al estudio de este bien patrimonial se ha logrado emplear una técnica fotogramétrica de bajo costo en conjunto con otras herramientas para la construcción del modelo 3D. Se espera que en futuras acciones se continúe la búsqueda de información y de los planos originales para generar documentación digital que contribuya a generar un modelo 3D más exacto, que permita ser utilizada en el estudio integral y multidisciplinario de esta obra. Queda demostrado aquí que estos procedimientos, como la fotogrametría en conjunto con otras herramientas tecnológicas, pueden utilizarse con éxito para la generación de documentación, en este caso, el modelo digital 3D, del patrimonio cultural.

En cuanto a conclusiones más específicas de los procedimientos llevados a cabo, se puede señalar la necesidad de una segunda toma fotográfica del puente y relevamientos periódicos sistemáticos, dado que se encuentra en uso y en constante cambio, al igual que su contexto y paisaje circundante.

El modelo 3D generado refleja la intención proyectual original, no el estado actual del puente. Para lograr esto, sería necesario realizar un relevamiento fotogramétrico más complejo, lo que implicaría más tiempo, recursos y equipos específicos para esos fines. Esto permitiría obtener un modelo digital que refleje el estado actual de este bien patrimonial y pueda utilizarse como testimonio del paso del tiempo en una obra que aún cumple su función. Para este nuevo relevamiento, es crucial tener en cuenta que uno de los lados del puente carece de iluminación natural adecuada debido a su orientación. Esto significa que requerirá más tiempo para realizar cada captura fotográfica en ese lado específico. Sería una solución adecuada la implementación de iluminación artificial pero podría resultar en costos significativos. Una posible mejora en este relevamiento podría ser el uso de otras herramientas tecnológicas, como drones o sistemas de láser escáner, no solo por la precisión que ofrecen, sino también para acceder a los intersticios del puente y poder realizar el relevamiento de la obra completa.

El modelo 3D obtenido permite realizar diversas acciones que favorecen la difusión, de carácter patrimonial, de obras de esta naturaleza. Es posible explorar el patrimonio cultural de una forma inmersiva y realista, con el uso de realidad aumentada y virtual, y ya en el mundo físico, posibilita la creación de réplicas mediante técnicas de fabricación digital (impresión 3D) que pueden ser utilizadas para su estudio o para ser presentadas en espacios de difusión como museos o instituciones educativas.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a los Arq. Marcela Nacarate, Arq. Martin Marigo y Arq. Enrique Ferrari. A la Jefe de Hemeroteca, Bibl. Cecilia Acuña y personal del Sistema de Información Integrado (SII), Biblioteca “JULIO R. CASTIÑEIRAS” de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. A la D.I. Marianela Lara. Al Prof. Dr. Ing. Salvatore Barba de la Universidad de Salerno (UNISA), Italia.

Referencias

Agisoft Metashape **User Manual: Professional Edition, Version 2.0**. Copyright © 2023 Agisoft LLC. Disponible en: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf Acceso en: 19 de nov. 2023.

ANTINOZZI, S.; RONCHI, D.; BARBA, S. **Macro and micro photogrammetry for the virtualization of the Orphic Foil (V-IV B.C.) of National Museum of Vibo Valentia [Macro e micro fotogrammetria per la virtualizzazione della Laminetta Orfica (V-IV a.C.) del Museo Nazionale di Vibo Valentia]**. 10.3280/oa-548.86. 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344330380_Macro_and_micro_photogrammetry_for_the_virtualization_of_the_Orphic_Foil_V-IV_BC_of_National_Museum_of_Vibo_Valentia_Macro_e_micro_fotogrammetria_per_la_virtualizzazione_della_Laminetta_Orfica_V-IV_aC. Acceso en: 19 de nov. 2023.

BARBA, S.; FIORILLO, F. **Restitución de datos láser escáner para el análisis de deterioro de bóvedas de ladrillo**. X Congreso Internacional Expresión Gráfica aplicada a la Edificación Graphic Expression applied to Building International Conference APEGA 2010. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/293483872_Restitucion_de_datos_laser_escaner_para_el analisis_del deterioro_de_bovedas_de_ladrillo. Acceso en: 19 de nov. 2023.

Concejo Deliberante de la ciudad de La Plata. **Decreto Nº25. Expte. 61873. 2018**. Disponible en: https://www.concejodeliberante.laplata.gob.ar/decretosconcejo/2018/dec25_18.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.

CHAVEN CARRA, L.; BARBA, S.; SÁNCHEZ RIVERA, J. I. **Primer levantamiento del puente de Maderuelo: actuaciones de emergencia para documentar un puente de presencia intermitente**. Biblioteca: estudio e investigación, ISSN 1132-225X, Nº. 34, Págs. 147-172. 2019. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7632180> Acceso en: 19 de nov. 2023.

DEFRANCO, G.; FUERTES, L.; LOPRESTI, L.; GAVINO, S.; LARA, M. **Análisis dimensional de modelos obtenidos por fotogrametría de piezas mecánicas**. A Revista Brasileira de Expressão Gráfica – RBEG é editada pela Associação Brasileira de Expressão Gráfica – ABEG. Vol. 5, No. 2, 2017. ISSN 2318-7492. 2017. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103737>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

FIORILLO, F.; REMONDINO, F.; BARBA, S.; SANTORIELLO, A. DE VITA, C. B.; CASELLATO, A. **3D digitization and mapping heritage monuments and comparison with historical drawings**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W1, 2013 XXIV International CIPA

Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France. 2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/274676682_3D_digitization_and_mapping_of_heritage_monuments_and_comparison_with_historical_drawings. Acceso en: 19 de nov. 2023.

FUERTES, L.; LOPRESTI, L. A.; SPERONI, L.; GAVINO, S.; DEFRANCO, G. **Fotogrametría rápida con un dispositivo móvil. Aplicación experimental sobre el motor portátil (locomóvil) de Isla Negra.** Actas del Congreso Argentino y Latinoamericano de Ingeniería 2021: CADI CLADI CAEDI 2021. 5° Congreso Argentino de Ingeniería (CADI). 11° Congreso Argentino de Enseñanza de la Ingeniería (CAEDI). 3° Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI). Facultad de Ingeniería - UBA. ISBN 978-987-88-1872-6. 2021. Disponible en: https://confedi.org.ar/publicaciones/cadi/Libro_CADI_TOMO1_22-11-18.pdf. Acceso en: 19 de nov. 2023.

GERARDI, D. **Memoria “Camino Afirmado De la Plata A Avellaneda. Puente En Arco Oblicuo De Cemento Armado Sobre Las Vías Del F. C. Sud (Ramal De Ringuelet A Ferrari)”.** Taller De Impresiones Oficiales. 1916.

GONNETDIGITAL. **Gonnet: Un camión chocó con el arco del Puente Donato Gerardi.** 2021. Disponible en: <https://fmgonnet.blogspot.com/search?q=puede+donato+gerardi>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

LEON LESCANO, N.; BARNET, Y.; RACCHUMI SANTILLAN, A. **Captura de datos 3D para virtualizar el patrimonio cultural.** ISSN (impreso): 1812-6049; ISSN (en línea): 2523-1820. 2020. Disponible en: <https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista30/articulo7.pdf>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

LIMA, L. **Puente “Donato Gerardi”: Un puente patrimonial de hormigón armado en servicio durante 90 años.** 2006. Disponible en: <https://digital.cic.gba.gob.ar/collections/e613fa1c-5ab4-4bf6-a039-73f47a14841d>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J.; LANE, S. **Structure from Motion (SFM) Photogrammetry.** Loughborough University. Journal contribution. Disponible en: https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/Structure_from_motion_SFM_photogrammetry/9457355. 2015.

Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad (Provincia). **Falleció el ingeniero Donato Gerardi: Ex director de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires.** Revista Vialidad. Editado por: Dirección de Vialidad. Sección de Biblioteca y Publicaciones. La Plata. 1962 (Nº20). p. 49. R.N.P.I. no. 586.585. 1962. Disponible en: <http://www.vialidad.gba.gov.ar/documentos/archivos/70Publicaciones%20y%20Biblioteca/200806230956340.Revista%20Vialidad%20N%C2%BA%2020.pdf>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

MOON D.; KWON S. W.; CHUNG, S.; LEE, S. Y.; KO, T. K. **Pre-processing methodology of image compensation using histogram equalization for generating point-cloud of construction environment.** Proceedings of the 34rd ISARC, Taipei, Taiwan. Págs 486-492. <https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0067>. 2017.

MORENA, S.; MOLERO ALONSO, B.; BARRERA-VERA, J. A.; BARBA, S. **As-built graphic documentation of the Monumento a la Tolerancia. Validation of low-cost survey techniques.** EGE Revista de Expresión Gráfica en la Edificación, (13), 98–114. <https://doi.org/10.4995/ege.2020.14766>. 2020.

NEGRELLI, O.; NIVIO C. A.; CRAVERO, J. J.; GARRO, J.; PANELLA, S. **Proyecto de ley Declarando patrimonio arquitectónico y cultural de la provincia de Buenos Aires al puente de hormigón armado "Donato Gerardi" ubicado en el camino general Belgrano, localidad de Gonnet, partido de La Plata. 2011.** Disponible en: <https://intranet.hcdiputados-ba.gov.ar/proyectos/11-12D2918012018-08-1515-34-4.pdf>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

OBSERVATORIO DE PATRIMONIO Y PAISAJE. Colegio de Arquitectos Distrito 1. **El patrimonio como estrategia para el desarrollo social y sustentable. Puente Donato Gerardi.** Jornadas latinoamericanas, de patrimonio y desarrollo. ICOMOS Argentina. 2016. Disponible en: https://issuu.com/icomosargentina/docs/ponencias_3ras_jornadas_de_patrimo_n_910f10fa38f19a. Acceso en: 19 de nov. 2023.

SANZ-ABLANEDO, E.; CHANDLER, J.H.; WACKROW, R. **Parameterising Internal Camera Geometry with Focusing Distance.** The Photogrammetric Record, 27: 210-226. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2012.00677.x>. 2012.

TRAVERSA L. P. **Corrosión de armaduras en el hormigón armado: una problemática del patrimonio moderno.** Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. 2do Congreso Iberoamericano y X Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio, COIBRECOPA, La Plata, 2011. Disponible en: <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/28>. Acceso en: 19 de nov. 2023.

ZHAN, K.; FRITSCH, D., WAGNER, J. F. **Integration of photogrammetry computed tomography and endoscopy for gyroscope 3D digitization.** The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVI-M-1-2021. 28th CIPA Symposium "Great Learning & Digital Emotion", 28 August–1 September 2021, Beijing, China. 2021. Disponible en: <https://d-nb.info/1240388799/34>. Acceso en: 19 de nov. 2023