© ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA 56 (2025): 63-74. ISSN 1989-4104. <https://www.laiesken.net/arqueologia/>.

METHOD ARTICLE

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS EN LA INTEGRACIÓN DE DATOS PARA LA MODELIZACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL: ESTADO DE LA CUESTIÓN Y APLICACIÓN AL *QHAPAQ ÑAN*, ECUADOR

Challenges and Perspectives in Data Integration for Cultural Heritage Modeling: State of the Art and Application to the Qhapaq Ñan, *Ecuador*

Mauro José Jiménez Granizo,[1,2] José Enrique Priego de los Santos,[1] Pedro Antonio Carretero Poblete,[3] Oscar Omar Espíndola Lara [4]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, España; [2] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador;
[3] Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador; [4] GEOcentro UNIGIS, Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Ecuador
✉ mauro.jimenez@alumnos.upm.es (autor de contacto)

Figura 1. Flujo de trabajo digital en la modelización del patrimonio cultural
(M. J. Jiménez, 2025, elaboración propia con asistencia de IA).

***RESUMEN**. Este artículo presenta una revisión crítica del estado de la cuestión sobre la modelización digital del patrimonio cultural, destacando su relevancia para la conservación, gestión y difusión de bienes culturales. Se analizan las principales metodologías geomáticas empleadas, como la fotogrametría, el escaneo láser terrestre, los sistemas de*

Received: July 5, 2025. Accepted: August 8, 2025. Published: August 25, 2025.

Edited & Published by Pascual Izquierdo [P. I. Egea]. Arqueol. Iberoam. Open Access Journal.
Creative Commons License (CC BY 4.0). https://n2t.net/ark:/49934/384. https://purl.org/aia/5607.

información geográfica (SIG), el HBIM («Historic Building Information Modeling») y los gemelos digitales, subrayando su capacidad para generar representaciones tridimensionales precisas y semánticamente enriquecidas. A partir de este marco, se examina la aplicación metodológica al tramo Moraspamba-Tres Cruces del «Qhapaq Ñan» (sistema vial andino), exponiendo sus desafíos específicos de documentación y conservación. Se plantean además líneas futuras de investigación centradas en la integración de metodologías híbridas, plataformas digitales participativas, modelos HBIM aplicados a la restauración y el uso de inteligencia artificial para anticipar riesgos patrimoniales. La propuesta busca transitar de un enfoque descriptivo a una aproximación práctica e interdisciplinar que aporte soluciones innovadoras para la gestión sostenible del patrimonio cultural.

***PALABRAS CLAVE**. Modelización digital del patrimonio, HBIM, gemelos digitales, geomática aplicada, interoperatividad de datos,* Qhapaq Ñan*, Ecuador.*

***ABSTRACT**. This paper presents a critical review of the state of the art in digital modeling of cultural heritage, highlighting its relevance for the conservation, management, and dissemination of cultural assets. It analyzes key geomatic methodologies such as photogrammetry, terrestrial laser scanning, geographic information systems (GIS), HBIM (Historic Building Information Modeling), and digital twins, emphasizing their ability to generate accurate and semantically enriched three-dimensional representations. Based on this framework, the methodological application to the Moraspamba-Tres Cruces section of the "Qhapaq Ñan" (Andean road system) is examined, addressing its specific documentation and conservation challenges. Future lines of research are also proposed, focusing on the integration of hybrid methodologies, participatory digital platforms, HBIM models applied to restoration, and the use of artificial intelligence to anticipate heritage risks. The proposal seeks to move from a descriptive approach to a practical and interdisciplinary perspective that provides innovative solutions for the sustainable management of cultural heritage.*

***KEYWORDS**. Digital heritage modeling, HBIM, digital twins, applied geomatics, data interoperability,* Qhapaq Ñan*, Ecuador.*

1. INTRODUCCIÓN

La modelización 3D del patrimonio cultural (figura 1) es una pieza clave en el registro digital para la conservación, gestión y difusión de bienes históricos. Esta tecnología permite crear modelos tridimensionales precisos, facilitando su estudio y preservación (Vital & Sylaiou 2022). Esta documentación gráfica y analítica ayuda a mitigar los riesgos en el patrimonio histórico asociados con el cambio climático, como inundaciones, tormentas, incendios forestales, deslizamientos de tierra y subidas del nivel del mar; los cuales pueden causar daños irreparables y severos, incluyendo la posible sumersión de lugares reconocidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (Sesana *et al.* 2021).

Esta información permite generar representaciones tridimensionales detalladas, integrando no solo la geometría, sino también información semántica como materiales, patologías, fases constructivas y transformaciones históricas, y posibilita así una comprensión más profunda del objeto patrimonial (Fregonese *et al.* 2021). Esta representación facilita la detección temprana de deterioros, la planificación de intervenciones más eficaces y la evaluación de escenarios de riesgo antes señalados y, en contextos de pérdida o transformación irreversible, los modelos digitales actúan como respaldo documental fiel, propiciando acciones de reconstrucción o restitución (De Luca 2020).

Las tecnologías geomáticas juegan un papel esencial en la documentación del patrimonio cultural; la fotogrametría, el escaneo láser terrestre y aéreo y los sistemas de información geográfica (SIG), entre otras, permiten la creación de modelos 3D precisos y detallados de sitios u objetos de interés cultural. Actualmente, estas herramientas son imprescindibles no solo en la evaluación de cualquier tipo de riesgo, sino también en la proyección de restauraciones, facilitando una mejor gestión del patrimonio (Donato & Giuffrida 2019). Al mismo tiempo, para mejorar la integración de los datos obtenidos de distintas fuentes y técnicas, la ingeniería geomática juega un papel muy importante en el momento de la interpretación y la gestión (Alfio *et al.* 2022).

La modelización patrimonial se ha convertido en una prioridad para la documentación digital de estos bie-

Figura 2. Tramo del *Qhapaq Ñan* (Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, INPC, 2024).

nes inmuebles, además de su protección frente a los crecientes riesgos que amenazan su integridad. Más allá de ser una herramienta técnica para la conservación, esta práctica también amplía las posibilidades de acceso e interpretación del patrimonio, generando nuevas formas de acercamiento y valoración (Pavelka & Pacina 2023). Gracias a ello, tanto las comunidades locales como el público en general pueden reconectar con su historia y cultura, fortaleciendo así su vínculo con los legados materiales que forman parte de su identidad colectiva (Ponciano *et al.* 2021).

La implementación de estas tecnologías sobre los bienes patrimoniales permite disponer de documentación precisa que facilite su preservación, gestión y promoción. Dicha información es adaptable a diferentes contextos que promuevan la participación de diversas partes interesadas, desde expertos hasta el público general (Gaspari *et al.* 2024). La metodología utilizada hace uso generalmente de técnicas avanzadas para la captura y recopilación de datos, como la fotogrametría y el escaneo láser. El resultado obtenido se integra en diversas plataformas digitales, lo que facilita su análisis, visualización y tratamiento, contribuyendo a la toma de decisiones basadas en evidencias sobre la conservación y uso del patrimonio (Donato & Giuffrida 2019).

Entre las diferentes categorías del patrimonio cultural se encuentran los sistemas viales históricos, que representan un tipo especial y complejo para modelizar y documentar debido a su gran extensión, fragmentación de evidencias, heterogeneidad topográfica, ubicación geográfica, dispersión de sus restos materiales y factores sociales, culturales y ambientales (Breier 2013).

Un caso representativo de esta complejidad es el *Qhapaq Ñan* (sistema vial andino) (figura 2) inscrito en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO el 21 de junio de 2014 (Losson 2017). Para abordar adecuadamente su preservación y gestión, resulta esencial la integración de tecnologías avanzadas como el escaneo LiDAR, la fotogrametría aérea y los sistemas de información geográfica.

En este trabajo de investigación se propone una revisión crítica del estado de la cuestión en tecnologías de documentación patrimonial como base para su futura aplicación metodológica en un tramo específico del *Qhapaq Ñan*, contribuyendo así a la formulación de soluciones innovadoras, contextualizadas y sosteni-

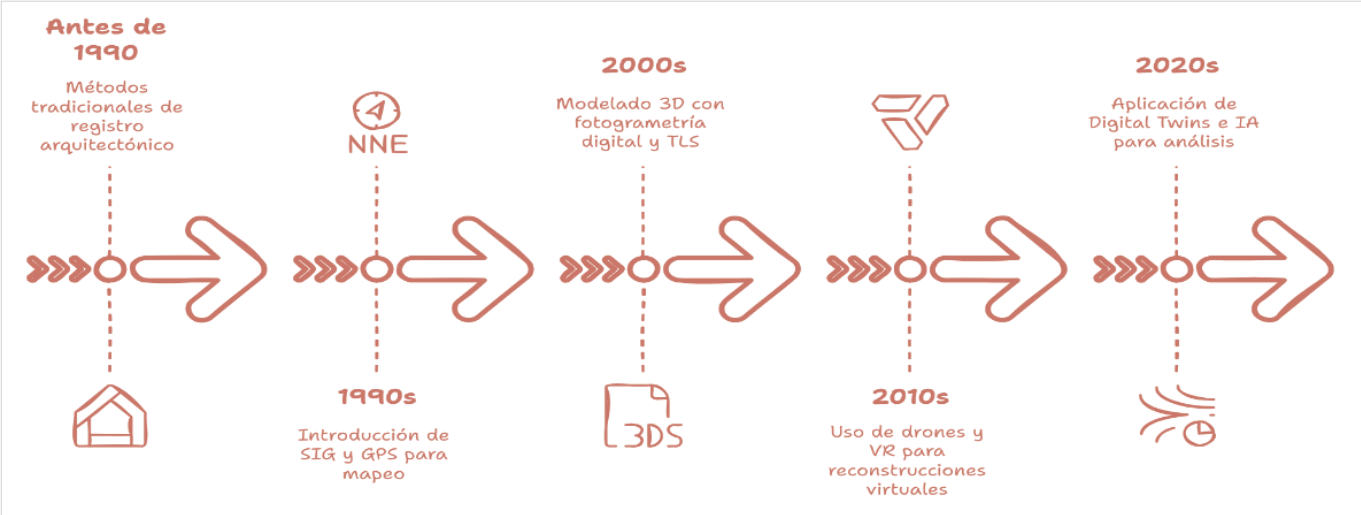

Figura 3. Línea de tiempo de la evolución de tecnologías aplicadas al patrimonio.

bles para su preservación. Esto supone un gran desafío para la generación de metodologías complejas que permitan la conservación y gestión de este tipo de patrimonio.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

Este estado de la cuestión se fundamenta en un enfoque cualitativo de revisión crítica y sistematización teórica centrado en publicaciones indexadas en bases de datos académicas como *Scopus* y *Web of Science*. Se identificaron y analizaron estudios relevantes sobre tecnologías como la fotogrametría digital, el escaneo láser terrestre (TLS), los sistemas de información geográfica (SIG), el modelado HBIM y los gemelos digitales, considerando su evolución, ventajas, limitaciones y grado de implementación en el ámbito patrimonial.

El presente marco teórico permite comprender cómo dichas tecnologías han contribuido no solo a la precisión en la documentación tridimensional, sino también a la interoperatividad de datos, la visualización inmersiva y la planificación de intervenciones de conservación. Se destaca la transición desde enfoques descriptivos hacia modelos predictivos, habilitados por el uso de inteligencia artificial y sistemas semánticos, lo cual abre nuevas líneas de investigación orientadas a la sostenibilidad técnica y la toma de decisiones documentadas en entornos patrimoniales.

La *documentación patrimonial* se entiende como un proceso continuo que permite monitorear, comprender y conservar los bienes culturales mediante la generación de información oportuna y adecuada. Incluye tanto la acción de recopilar datos métricos, narrativos, temáticos o sociales como la obtención del producto documental resultante que sustenta la gestión del patrimonio (Santana-Quintero *et al.* 2008).

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) y el modelado 3D de edificios históricos (HBIM) ha mejorado la capacidad de gestionar y analizar la información con valor interpretativo relacionada con el patrimonio construido, fusionando variables espaciales y atributos descriptivos en un sistema digital unificado (Yang *et al.* 2020).

La *modelización digital* es un proceso que integra los dominios informativo y físico para conectar los mundos material y virtual. Este concepto es fundamental en la creación de gemelos digitales, que son representaciones virtuales precisas de entidades físicas.

La modelización digital permite la monitorización, simulación, predicción y optimización de sistemas, siendo esencial para la transformación digital y la mejora inteligente de procesos (Wu *et al.* 2021). Asimismo, se estructura en modelos conceptuales, arquitecturas de sistemas y modelos de datos, lo que permite una representación fiel y funcional de las entidades físicas (Davila & Oyedele 2021).

Desde finales del siglo XX, la documentación del patrimonio cultural ha transitado desde métodos manuales hacia sistemas digitales cada vez más sofisticados (figura 3). En los años noventa, la incorporación de tecnologías geoespaciales como los SIG y el GNSS permitió mapear y georreferenciar el patrimonio con mayor precisión. Posteriormente, la fotogrametría digital y el escaneo láser terrestre abrieron paso al modelado 3D, facilitando el registro detallado de formas complejas. A partir de 2010, el uso de drones y entornos

virtuales mejoró la cobertura y visualización de los bienes culturales. Más recientemente, la integración de gemelos digitales e inteligencia artificial ha transformado la gestión patrimonial, permitiendo análisis predictivos y sostenibles en tiempo real (Dore & Murphy 2017).

Tecnologías inmersivas como la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) han revolucionado sustancialmente la forma en que los visitantes se relacionan con los entornos patrimoniales, obteniendo resultados más interactivos y educativos que mejoran su experiencia y satisfacción; logrando facilitar la preservación y documentación y promoviendo el compromiso de la comunidad con el patrimonio cultural (Garg *et al.* 2024).

Por otro lado, la incorporación del concepto de gemelos digitales ha abierto nuevas posibilidades en la gestión del patrimonio construido al ofrecer representaciones virtuales que reflejan el estado de los bienes en tiempo real. Esta tecnología no solo mejora la eficiencia en las tareas de conservación, sino que también permite tomar decisiones más informadas y sostenibles a lo largo del tiempo (Davila & Oyedele 2021). Estas tecnologías digitales han hecho posible el desarrollo de entornos más inteligentes y receptivos capaces de ajustarse a las necesidades e intereses de quienes los visitan. Un ejemplo de ello puede observarse en exposiciones de arte temporales, donde la experiencia del público se enriquece mediante soluciones interactivas y personalizadas (Chianese & Piccialli 2016).

La *fotogrametría digital* actual se apoya en vehículos aéreos no tripulados (UAV) para la captura de datos y se complementa con el escaneo láser terrestre (TLS), consolidándose como una herramienta clave en los procesos de documentación tridimensional del patrimonio cultural. Su capacidad para capturar los detalles arquitectónicos con alta precisión resulta especialmente valiosa en la generación de modelos HBIM, que integran tanto información geométrica como semántica del bien patrimonial (Alshawabkeh *et al.* 2021). La combinación de ambas tecnologías no solo permite cubrir zonas de difícil acceso, sino que también enriquece la calidad de los modelos 3D al integrar datos provenientes de distintas fuentes, favoreciendo así representaciones más completas y fiables (Rocha *et al.* 2020).

Los *sistemas de información geográfica* (SIG) se han consolidado como herramientas esenciales para la organización, consulta y análisis de datos espaciales y contextuales vinculados al patrimonio cultural. Cuando se integran con modelos BIM, esta sinergia tecnológica permite optimizar la gestión de la información geoespacial, facilitando procesos analíticos más complejos y detallados (Pepe *et al.* 2021). Esta combinación no solo potencia la capacidad de representación tridimensional de los sitios patrimoniales, sino que también fortalece las estrategias de conservación al proporcionar una visión más completa e interrelacionada del entorno cultural y sus elementos constitutivos (Yang *et al.* 2020).

La *tecnología BIM* y su adaptación al patrimonio en edificios históricos permite integrar representaciones tridimensionales detalladas con sistemas estructurados de gestión de datos. Esta metodología posibilita una documentación precisa y enriquecida de edificaciones históricas al vincular su geometría con información relevante sobre materiales, técnicas constructivas, procesos de deterioro y acciones de conservación (Martín-Lerones *et al.* 2021).

Asimismo, la metodología *Scan-to-BIM* se ha convertido en un proceso clave para convertir datos capturados mediante escaneo láser y fotogrametría en modelos paramétricos enriquecidos que combinan precisión geométrica con información estructurada. Esta técnica permite generar representaciones digitales inteligentes que facilitan una documentación rigurosa y completa de bienes patrimoniales al integrar tanto su forma tridimensional como sus atributos constructivos y contextuales (Rocha *et al.* 2020).

Las *plataformas de visualización y gestión de modelos 3D* (*Unity3D*) constituyen entornos interactivos que posibilitan una exploración avanzada de modelos patrimoniales digitales al integrar funciones para la gestión y representación de información compleja (Andaru *et al.* 2019). Estas herramientas permiten no solo visualizar estructuras en detalle, sino también realizar mediciones, análisis espaciales y consultas informativas, lo que incrementa la accesibilidad, comprensión y aplicabilidad de los datos en contextos de conservación, investigación y difusión (McAvoy *et al.* 2023).

Los mayores desafíos en la integración de datos espaciales de bienes patrimoniales están basados en la interoperatividad y estandarización, la calidad y compatibilidad de los datos, el manejo de grandes volúmenes de información y la sostenibilidad técnica y financiera de los proyectos.

En cuanto al primero de ellos, la interoperatividad y estandarización, se trata de garantizar una comunicación fluida entre distintos sistemas y plataformas tecnológicas, la cual resulta fundamental para lograr una verdadera interoperatividad y estandarización en la gestión de datos patrimoniales. En este sentido, la adopción de enfoques como el HBIM ha demostrado ser eficaz para facilitar el intercambio estructurado de in-

formación mediante el uso de estándares abiertos como las *Industry Foundation Classes* (IFC), que permiten mantener la integridad y el valor semántico de los datos durante su transferencia (Zuric *et al.* 2023). Asimismo, herramientas como el *software* modulador de código abierto utilizado en infraestructuras digitales orientadas al patrimonio cultural han evidenciado su potencial para abordar los retos asociados a la interoperatividad, promoviendo la integración de múltiples fuentes de información y fortaleciendo la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas digitales patrimoniales (Bardi *et al.* 2014).

El segundo hace referencia a la calidad y compatibilidad de datos, por lo que la integración efectiva de datos patrimoniales enfrenta desafíos fundamentales relacionados con la calidad y la compatibilidad de la información. En contextos donde se digitalizan infraestructuras a lo largo de su ciclo de vida, resulta indispensable trabajar con formatos estandarizados y sistemas de clasificación unificada que garanticen la coherencia, trazabilidad y fiabilidad de los datos. La ausencia de estos criterios puede generar inconsistencias, redundancias y pérdida de información clave, afectando tanto a los procesos de análisis como a la toma de decisiones en conservación y gestión (Huang *et al.* 2025).

El tercero es el manejo de grandes volúmenes de información, cuya gestión representa otro reto clave en los procesos de integración de datos aplicados al patrimonio cultural. La digitalización masiva y la incorporación de tecnologías emergentes, como el *Internet de las Cosas* (IoT), han generado un crecimiento exponencial en la cantidad y diversidad de datos disponibles, lo que exige sistemas de gestión estructurados y mecanismos interoperables para su procesamiento e intercambio (Gleim *et al.* 2020). En este contexto, plataformas de código abierto como *Arches* han demostrado su eficacia al permitir la captura, organización y análisis de datos geoespaciales y contextuales, ofreciendo así una base sólida para la toma de decisiones documentadas en proyectos de conservación patrimonial (Clark 2022). Y, por último, el cuarto desafío, referido a la sostenibilidad técnica y financiera de los proyectos, constituye un pilar fundamental en la planificación y ejecución de proyectos de conservación del patrimonio cultural.

Desde el ámbito técnico, es esencial adoptar metodologías y tecnologías que aseguren la adaptabilidad y eficiencia de las intervenciones, como la implementación de modelos de información del patrimonio HBIM (*Historic Building Information Modeling*) y sistemas de monitoreo continuo. Estas herramientas permiten una gestión integral y dinámica de los bienes patrimoniales, facilitando su preservación a largo plazo (Baik & Boehm 2015).

En el aspecto financiero, la diversificación de fuentes de financiamiento, incluyendo fondos públicos, cooperación internacional y alianzas público-privadas, es crucial para garantizar la viabilidad económica de los proyectos. La integración de estrategias de valorización del patrimonio, como el turismo cultural sostenible, también contribuye a generar ingresos que pueden ser reinvertidos en su conservación (Chirikure *et al.* 2010). Un enfoque integral que combine estos elementos es indispensable para asegurar la continuidad y efectividad de las iniciativas de preservación patrimonial.

La digitalización del patrimonio histórico no solo representa un avance tecnológico, sino también un compromiso con la memoria cultural y arquitectónica de nuestras ciudades. Implementar proyectos bajo el enfoque *Scan-to-BIM*, como el descrito por Fregonese *et al.* (2021), implica considerar una serie de costes que van más allá de lo evidente. En términos directos, se requiere inversión en escáneres láser terrestres de alta precisión, equipos fotogramétricos como drones y licencias de *software* especializado en modelado HBIM, como *Autodesk Revit*, que permiten generar representaciones detalladas y fiables de estructuras complejas. A esto se suma la necesidad de contar con un equipo técnico multidisciplinar, capacitado no solo en el manejo de tecnologías, sino también en la lectura crítica del patrimonio. Los costes indirectos asociados a este tipo de proyectos, como la formación continua del personal, el mantenimiento de infraestructuras digitales, el almacenamiento seguro de los voluminosos datos generados (nubes de puntos) y la actualización periódica de los modelos digitales son indispensables para mantener su utilidad en procesos de conservación y gestión a largo plazo. Estos factores muestran que digitalizar el patrimonio no es simplemente un proceso técnico, sino una labor estratégica que exige visión, recursos y sensibilidad cultural (Fregonese *et al.* 2021).

3. CASO PRÁCTICO: EL CAMINO DEL INCA (*QHAPAQ ÑAN*)

Un caso emblemático de este tipo de patrimonio cultural es el *Qhapaq Ñan* (sistema vial andino). Se trata de una extensa red de caminos prehispánicos, conocida como *El Camino del Inca*, que atraviesa los Andes. Posee un alto valor cultural debido a su extensión y la diversidad de ecosistemas que conecta, en donde con-

Figura 4. *Qhapaq Ñan*: Camino Inca (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD, 2018).

vergen varias regiones y culturas desde Colombia hasta Chile (figura 4). Hasta la actualidad constituye un elemento articulador de tradiciones culturales (Bitelli *et al.* 2025). Por lo expuesto, se hace indispensable la integración de registros topográficos, escaneos remotos, documentación arqueológica y análisis geoespacial para su estudio y conservación.

Una primera aplicación metodológica de este trabajo de investigación se va a centrar en la sección Moraspamba-Tres Cruces del *Qhapaq Ñan* (subtramo Achupallas-Ingapirca, Chimborazo, Ecuador). Durante las visitas técnicas realizadas a la sección Moraspamba-Tres Cruces del *Qhapaq Ñan*, se identificaron diversas amenazas que comprometen la integridad del camino y de los elementos patrimoniales asociados. Entre las más relevantes destacan el avance de construcciones y procesos de urbanización, la instalación de infraestructuras de servicios, así como factores locales como la escorrentía o el uso cotidiano del camino, que afectan a su estabilidad estructural. A ello se suman impactos de origen ecológico o geológico, muchas veces imprevisibles. Estas alteraciones, observadas en sitios arqueológicos cercanos al trazado, reflejan la complejidad de conservar un patrimonio vivo que interactúa constantemente con su entorno físico y social.

Este estudio contempla una estrategia integral de documentación con base en enfoques geomáticos, fotogramétricos y modelización digital del patrimonio cultural centrada en el tramo Moraspamba-Tres Cruces del *Qhapaq Ñan* (figura 5), que comprende un total de 11.7 km y se encuentra situado en la parroquia Achupallas del cantón Alausí (Chimborazo, Ecuador), con coordenadas iniciales E 747450-N 9746248 y finales E 743391-N 9736674. En primera instancia se realizará un levantamiento fotogramétrico aéreo mediante UAV equipado con cámara RGB, con el objetivo de generar ortomosaicos de alta resolución, nubes de puntos densas y modelos digitales del terreno (MDT) y de superficie (MDS). Esta información permitirá identificar alteraciones físicas, patrones de erosión y afectaciones estructurales provocadas por agentes naturales y antrópicos. De forma complementaria, se pretende implementar un escaneo láser terrestre (TLS) en los puntos de mayor valor arquitectónico o patrimonial con el fin de obtener datos geométricos precisos de las estructuras asociadas al camino, tales como muros, graderíos, plataformas y sistemas hidráulicos. Los datos obtenidos serán integrados en un entorno de modelado HBIM (*Historic Building Information Modelling*), lo que facilitará la interoperatividad con sistemas GIS para el análisis espacial multiescalar. Finalmente, se planteará la construcción de un gemelo digital del tramo analizado que combine el modelo tridimensional con datos históricos, materiales y de conservación, permitiendo simular escenarios de deterioro, evaluar riesgos y proponer medidas de intervención sostenibles.

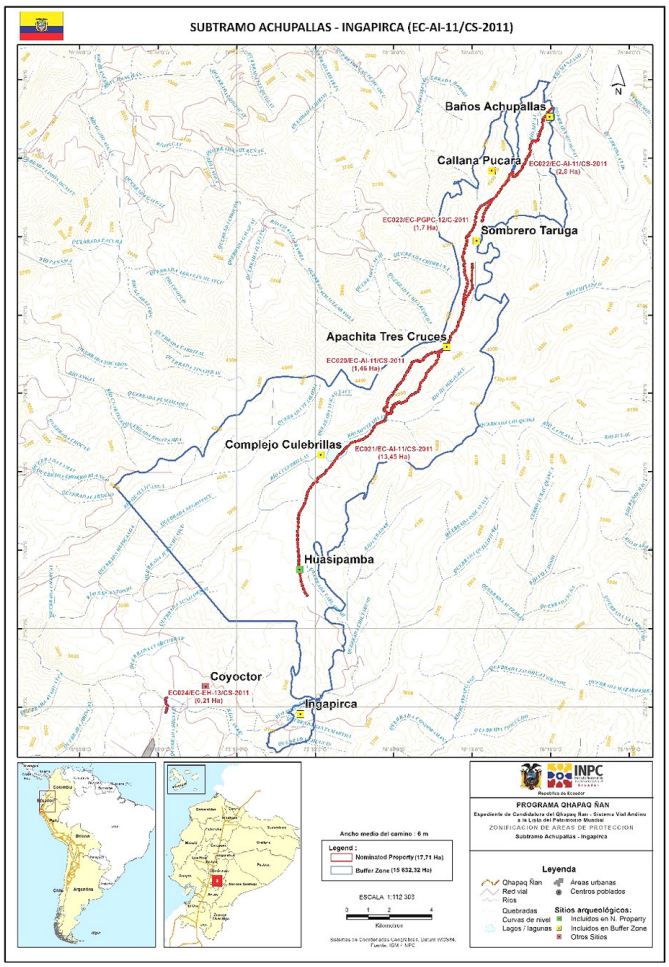

Figura 5. Situación geográfica del proyecto. Subtramo Achupallas-Ingapirca del *Qhapaq Ñan* (Instituto Nacional de Patrimonio Cultural, INPC, 2011).

Esta metodología se apoyará en principios de fotogrametría, escaneo láser, modelado paramétrico y análisis geoespacial, asegurando una base sólida para la gestión y conservación del patrimonio cultural andino.

Los *gemelos digitales* en el ámbito del patrimonio cultural están dando un paso significativo gracias a la integración de IA y modelos semánticos más sofisticados, lo cual está transformando profundamente la forma en que se conservan, interpretan y comparten esos bienes. Estos gemelos digitales no son solo copias 3D de objetos físicos, son sistemas dinámicos que permiten analizar, simular y prever comportamientos reales en tiempo casi real. La IA, al ser incorporada al modelo de *Reactive Heritage Digital Twins* (RHDT), no solo optimiza los procesos de análisis y predicción, sino que aporta una capa de inteligencia que mejora notablemente la capacidad de reacción ante amenazas como el deterioro estructural o cambios ambientales. Sin embargo, este potencial solo se materializa plenamente cuando la IA se apoya en estructuras ontológicas sólidas, como las que propone el modelo RHDT, capaces de organizar el conocimiento patrimonial de manera coherente y explicable. Gracias a esta base semántica, se logra no solo una mayor precisión, sino también transparencia en los procesos automatizados, ayudando a reducir errores como las llamadas «alucinaciones» típicas de sistemas de IA opacos. De esta forma, el gemelo digital se convierte en una herramienta cognitiva para la preservación del patrimonio, uniendo la potencia del análisis computacional con la riqueza histórica y cultural de los bienes que representa (Felicetti & Niccolucci 2025).

La incorporación de dichas tecnologías emergentes está transformando profundamente la manera en que se documentan y gestionan patrimonios de gran escala y complejidad como el *Qhapaq Ñan*. Estas herramientas no solo permiten consolidar información dispersa en estructuras de conocimiento más coherentes, sino que facilitan el análisis dinámico de las condiciones físicas y culturales del territorio en tiempo real.

De este modo, es posible anticipar riesgos, planificar intervenciones con mayor precisión y generar modelos predictivos útiles para su conservación a largo plazo (Felicetti & Niccolucci 2025). Permiten, además, automatizar tareas repetitivas, optimizar el flujo de trabajo entre equipos interdisciplinarios y fomentar entornos colaborativos más eficaces. Esto resulta especialmente valioso al abordar un sistema patrimonial tan extenso como la red vial andina, cuya gestión implica múltiples niveles de decisión, escalas territoriales y actores institucionales (He & Shen 2025).

Investigaciones recientes sobre la conservación del *Qhapaq Ñan* destacan la necesidad de avanzar hacia sistemas integrados que combinen modelos HBIM con gemelos digitales georreferenciados, apoyados por sensores IoT para el monitoreo en tiempo real del deterioro estructural y la presión antrópica. Esta convergencia tecnológica permite una gestión preventiva y menos invasiva del patrimonio, facilitando la detección temprana de riesgos y la toma de decisiones documentadas para la conservación sostenible (Vuoto *et al.* 2024).

Además, se subraya la importancia de desarrollar modelos predictivos basados en inteligencia artificial capaces de anticipar amenazas derivadas de fenómenos naturales o actividades humanas, lo que refuerza la resiliencia y la sostenibilidad del patrimonio (Rolim *et al.* 2024). Aunque existen avances en la digitalización y el uso de tecnologías emergentes, persisten desafíos como la estandarización de protocolos de información y la integración efectiva entre HBIM y gemelos digitales (Vuoto *et al.* 2024). En el caso específico del *Qhapaq Ñan*, se reconoce la urgencia de implementar un modelo digital integrado que permita la gestión coordinada entre los países involucrados, optimizando la protección y difusión de este patrimonio compartido (Duperré 2017).

En conjunto, la literatura sugiere que la combinación de estas tecnologías, junto con enfoques multidisciplinares, representa el camino más prometedor para la conservación preventiva y sostenible del *Qhapaq Ñan* y otros bienes patrimoniales (Vuoto *et al.* 2024).

4. CONCLUSIONES

Uno de los principales desafíos identificados en el presente estado de la cuestión es la fragmentación y falta de integración entre los diversos métodos tecnológicos empleados para documentar, conservar y gestionar el patrimonio cultural. A pesar de la disponibilidad de herramientas avanzadas como SIG, escaneo láser terrestre (TLS), UAV, HBIM y gemelos digitales, no existe aún una metodología consolidada que articule de forma efectiva estas tecnologías de manera contextualizada, especialmente en entornos patrimoniales complejos como el caso que nos ocupa, el *Camino del Inca*, *Qhapaq Ñan*. Esta revisión ha permitido visibilizar cómo herramientas como la fotogrametría digital, el escaneo láser (LiDAR), los sistemas de información geográfica en 3D (3D GIS) y los modelos HBIM están siendo aplicadas de forma cada vez más integrada para representar con precisión elementos patrimoniales complejos que, lejos de ser simples instrumentos de visualización,

se han consolidado como plataformas dinámicas para la gestión, el análisis y la conservación del patrimonio.

A pesar del notable avance en la adopción de tecnologías digitales para la conservación del patrimonio, aún persisten vacíos importantes en términos de integración y coordinación entre disciplinas. Uno de los retos más recurrentes es la interoperatividad de formatos y estándares, ya que muchos modelos y plataformas no dialogan entre sí de forma eficiente, dificultando el flujo fluido de información entre herramientas y actores. Esto se agrava por la ausencia de metodologías unificadas para la estructuración de modelos HBIM, especialmente en proyectos que implican una gran diversidad de fuentes como escaneos láser, archivos históricos, análisis de materiales y mapas arqueológicos.

Más allá del análisis técnico, este trabajo también pone en valor la dimensión humana y cultural del patrimonio digital, reconociendo que detrás de cada modelo tridimensional existe una historia, una comunidad y una memoria que merece ser conservada con rigor y sensibilidad. Al identificar tendencias emergentes como los gemelos digitales inteligentes, la IA aplicada al análisis patrimonial y el uso de estándares abiertos, se proponen nuevas perspectivas para superar las barreras actuales y avanzar hacia una digitalización más inclusiva, sostenible y significativa. En este contexto, esta investigación contribuye al conocimiento existente al ofrecer una mirada panorámica y crítica sobre la aplicación de tecnologías digitales al patrimonio cultural, centrando su atención en el caso del *Qhapaq Ñan*.

Al sistematizar el estado de la cuestión, no solo se identifican las principales herramientas y enfoques utilizados en la documentación y conservación del patrimonio, sino que también se evidencian brechas metodológicas específicas que limitan su aplicación efectiva en contextos complejos como los caminos ancestrales andinos. Estas brechas, vinculadas a la integración interdisciplinar, la participación comunitaria y la sostenibilidad técnica, requieren soluciones innovadoras que consideren las particularidades territoriales, culturales y estructurales del *Qhapaq Ñan* como patrimonio mundial.

5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Desarrollo de metodologías híbridas

Se propone el desarrollo de metodologías híbridas que integren tecnologías geomáticas avanzadas como el escaneo láser terrestre (TLS), la fotogrametría aérea con drones (RPAS) y las cámaras esféricas con enfoques participativos que valoren los saberes locales y el conocimiento social del patrimonio. Este tipo de integración no solo permitirá superar retos técnicos como las condiciones de accesibilidad o la complejidad arquitectónica de ciertos espacios, sino que también abrirá la puerta a modelos digitales más enriquecidos y significativos capaces de dialogar con múltiples escalas de análisis y usuarios. En este sentido, avanzar hacia marcos metodológicos que combinen el rigor técnico con la dimensión humana del patrimonio constituye una dirección clave para consolidar prácticas más inclusivas, sostenibles y culturalmente sensibles en el ámbito de la documentación patrimonial.

Integración de tecnologías digitales y participación comunitaria

El desarrollo de plataformas digitales abiertas que combinen documentación geomática avanzada con estrategias de narración inmersiva y accesible, tal como lo demuestra Gaspari *et al.* (2024) con el Castillo Farnese en Piacenza usando tecnologías como la fotogrametría, el escaneo láser terrestre y herramientas web interactivas de código abierto, permite no solo reconstruir con alta fidelidad sitios patrimoniales de difícil acceso, sino también comunicar sus historias de forma significativa a públicos diversos. Estas soluciones no requieren *software* especializado ni equipos costosos, lo que democratiza el acceso a la exploración del patrimonio cultural mediante navegaciones 3D, recorridos virtuales y narrativas espaciales personalizadas. Investigar cómo este tipo de plataformas puede adaptarse a distintos contextos patrimoniales, especialmente aquellos marginados o transformados por procesos urbanos, representa una oportunidad para repensar la divulgación, la educación patrimonial y la participación ciudadana desde una mirada inclusiva, tecnológica y sensible al territorio (Gaspari *et al.* 2024).

Aplicación de modelos HBIM en proyectos de restauración

La incorporación del HBIM se ha convertido en una herramienta cada vez más relevante en los procesos de conservación y restauración patrimonial. Al integrarse con métodos tradicionales de documentación, el HBIM permite visualizar con rapidez distintas propuestas de intervención, generar automáticamente planos técnicos y simular alternativas antes de intervenir físicamente

en el bien patrimonial. Esta sinergia entre lo digital y lo artesanal ha demostrado mejorar tanto la eficiencia como la toma de decisiones en proyectos donde cada detalle constructivo tiene un valor histórico significativo (Yang *et al.* 2020).

Colaboración interdisciplinar y uso de la inteligencia artificial

Este enfoque no solo facilita una gestión más ordenada y precisa de los datos técnicos, sino que también promueve una comunicación más fluida entre arquitectos, conservadores, ingenieros y arqueólogos. Propone la integración de tecnologías de inteligencia artificial, especialmente el aprendizaje automático, dentro de entornos colaborativos e interdisciplinarios para la protección del patrimonio cultural ante los crecientes efectos del cambio climático. Según lo evidenciado por Barrile *et al.* (2024), este enfoque no solo mejora la recopilación de datos ambientales mediante sensores, drones o imágenes satelitales, sino que también permite analizar, modelar y prever patrones de deterioro con una precisión creciente. La combinación de herramientas geomáticas con algoritmos de IA facilita la identificación temprana de riesgos, como la humedad, la salinidad o los movimientos del terreno, elementos críticos en contextos donde los eventos climáticos extremos se intensifican. A su vez, el artículo subraya que enfrentar estos desafíos requiere una integración real entre disciplinas técnicas y humanísticas, superando barreras sectoriales para construir sistemas inteligentes de conservación capaces de responder de forma ágil y preventiva ante amenazas ambientales.

Esta visión integrada no solo fortalece la toma de decisiones basada en datos geoespaciales, sino que también plantea un cambio de paradigma hacia una gestión patrimonial más anticipativa, resiliente y técnicamente avanzada (Barrile *et al.* 2024).

Agradecimientos

Este artículo forma parte de los primeros avances de una investigación en el marco del Programa de Doctorado en Ingeniería Geomática y constituye una contribución inicial al estudio del patrimonio cultural mediante tecnologías digitales. Mauro J. Jiménez expresa su sincero agradecimiento al Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) del Ecuador por el valioso respaldo técnico y por facilitar el acceso a información clave que ha sido fundamental para el desarrollo del caso estudiado. Asimismo, extiende un especial reconocimiento a sus tutores académicos por sus orientaciones constantes y aportes críticos que han enriquecido significativamente esta investigación.

REFERENCIAS

Alfio, V.S. *et alii*. 2022. A Geomatics Approach in Scan to FEM Process Applied to Cultural Heritage Structure: The Case Study of the "Colossus of Barletta". *Remote Sensing* 14, 3: 664. <https://doi.org/10.3390/rs14030664>.

Alshawabkeh, Y. *et alii*. 2021. Integration of Laser Scanner and Photogrammetry for Heritage BIM Enhancement. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10, 5: 316. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050316>.

Andaru, R. *et alii*. 2019. The combination of terrestrial LiDAR and UAV photogrammetry for interactive architectural heritage visualization using unity 3D game engine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42-2/W17: 39-44. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w17-39-2019>.

Baik, A.; J. Boehm. 2015. Building information modelling for historical building Historic Jeddah, Saudi Arabia. En *Digital Heritage (Granada, 2015)*, vol. 2, pp. 125-128. <https://doi.org/10.1109/DIGITALHERITAGE.2015.7419468>.

Bardi, A. *et alii*. 2014. Coping with interoperability and sustainability in cultural heritage aggregative data infrastructures. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies* 9, 2: 138-154. <https://doi.org/10.1504/IJMSO.2014.060341>.

Barrile, V. *et alii*. 2024. Review of Geomatics Solutions for Protecting Cultural Heritage in Response to Climate Change. *Heritage* 7, 12: 7031-7049. <https://doi.org/10.3390/heritage7120325>.

Bitelli, G. *et alii*. 2025. High-Detail 3D Reconstruction and Digital Strategies for the Enhancements of Archaeological Properties in Museums. *Heritage* 8, 2: 49. <https://doi.org/10.3390/heritage8020049>.

Breier, M. 2013. Getting Around in the Past: Historical Road Modelling. En *Understanding Different Geographies*, eds. K. Kriz *et alii*, pp. 215-226. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29770-0_16>.

Chianese, A.; F. Picciali. 2016. A smart system to manage the context evolution in the Cultural Heritage domain. *Computers & Electrical Engineering* 55: 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.02.008>.

Chirikure, S. *et alii*. 2010. Unfulfilled promises? Heritage management and community participation at some of Africa's cultural heritage sites. *International Journal of Heritage Studies* 16, 1-2: 30-44. <https://doi.org/10.1080/13527250903441739>.

Clark, K. 2022. Review Issues in Preservation Policy. *The Historic Environment: Policy & Practice* 13, 4: 547-550. <https://doi.org/10.1080/17567505.2022.2148354>.

Davila, J.M.; L. Oyedele. 2021. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics* 49: 101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>.

De Luca, L. 2020. Towards the Semantic-aware 3D Digitisation of Architectural Heritage: The "Notre-Dame de Paris" Digital Twin Project. En *Proceedings of the 2nd Workshop on Structuring and Understanding of Multimedia HeritAge Contents*, pp. 3-4. <https://doi.org/10.1145/3423323.3423415>.

Donato, E.; D. Giuffrida. 2019. Combined Methodologies for the Survey and Documentation of Historical Buildings: The Castle of Scalea (CS, Italy). *Heritage* 2, 3: 2384-2397. <https://doi.org/10.3390/heritage2030146>.

Dore, C.; M. Murphy. 2017. Current state of the art historic building information modelling. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42-2/W5: 185-192. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-185-2017>.

Duperré, G.N. 2017. Proposing a digital information system for the management and conservation of the Qhapaq Ñan, Andean Road System. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42-2/W5: 193-200. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLII-2-W5-193-2017>.

Felicetti, A.; F. Niccolucci. 2025. Artificial Intelligence and Ontologies for the Management of Heritage Digital Twins Data. *Data* 10, 1: 1. <https://doi.org/10.3390/data10010001>.

Fregonese, M. *et alii*. 2021. Drug Checking as Strategy for Harm Reduction in Recreational Contests: Evaluation of Two Different Drug Analysis Methodologies. *Frontiers in Psychiatry* 12: 596895. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2021.596895>.

Garg, A. *et alii*. 2024. Evolution of Immersive Technologies and Their Impact on Visitor Engagement in Cultural Heritage Sites. *Evolutionary Studies in Imaginative Culture* 8.1, S2: 1012-1020. <https://doi.org/10.70082/esiculture.vi.1190>.

Gaspari, F. *et alii*. 2024. An Open-Source Web Platform for 3D Documentation and Storytelling of Hidden Cultural Heritage. *Heritage* 7, 2: 517-536. <https://doi.org/10.3390/heritage7020025>.

Gleim, L. *et alii*. 2020. FactDAG: Formalizing Data Interoperability in an Internet of Production. *IEEE Internet of Things Journal* 7: 3243-3253. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2966402>.

He, Y.; W. Shen. 2025. Agent-based digital twins for collaborative machine intelligence solutions. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing* 7, 1: e70018. <https://doi.org/10.1049/cim2.70018>.

Huang, Y. *et alii*. 2025. A Framework of Life-Cycle Infrastructure Digitalization for Highway Asset Management. *Sustainability* 17, 3: 907. <https://doi.org/10.3390/su17030907>.

Losson, P. 2017. The inscription of Qhapaq Ñan on UNESCO's World Heritage List: a comparative perspective from the daily press in six Latin American countries. *International Journal of Heritage Studies* 23, 6: 521-537. <https://doi.org/10.1080/13527258.2017.1287117>.

Martín-Lerones, P. *et alii*. 2021. BIM Supported Surveying and Imaging Combination for Heritage Conservation. *Remote Sensing* 13, 8: 1584. <https://doi.org/10.3390/RS13081584>.

McAvoy, S. *et alii*. 2023. Openheritage3D: Building an open visual archive for site scale giga-resolution LiDAR and photogrammetry data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 10-M-1: 215-222. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-x-m-1-2023-215-2023>.

Pavelka, K.; J. Pacina. 2023. Using of modern technologies for visualization of cultural heritage. *Stavební Obzor* 32, 4: 549-563. <https://doi.org/10.14311/cej.2023.04.0041>.

Pepe, M. *et alii*. 2021. Scan to BIM for the digital management and representation in 3D GIS environment of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage* 50: 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.006>.

Ponciano, J.J. *et alii*. 2021. From Acquisition to Presentation. The Potential of Semantics to Support the Safeguard of Cultural Heritage. *Remote Sensing* 13, 11: 2226. <https://doi.org/10.3390/rs13112226>.

Rocha, G. *et alii*. 2020. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage* 3, 1: 47-67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>.

Rolim, R. *et alii*. 2024. Analysis of the Current Status of Sensors and HBIM Integration: A Review Based on Bibliometric Analysis. *Heritage* 7, 4: 2071-2087. <https://doi.org/10.3390/heritage7040098>.

Santana-Quintero, M.S. *et alii*. 2008. *Heritage documentation for conservation: partnership inlearning*.

Sesana, E. *et alii*. 2021. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 12, 4: e710. <https://doi.org/10.1002/wcc.710>.

Vital, R.; S. Sylaiou. 2022. Digital survey: How it can change the way we perceive and understand heritage sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 24: e00212. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00212>.

Vuoto, A. *et alii*. 2024. Shaping Digital Twin Concept for Built Cultural Heritage Conservation: A Systematic Literature Review. *International Journal of Architectural Heritage* 18, 11: 1762-1795. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2258084>.

Wu, C. *et alii*. 2021. Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model. *Journal of Manufacturing Systems* 58, B: 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.006>.

Yang, X. *et alii*. 2020. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage* 46: 350-360. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>.

Zuric, J. *et alii*. 2023. Integrating HBIM and Sustainability Certification: A Pilot Study Using GBC Historic Building Certification. *International Journal of Architectural Heritage* 17, 9: 1464-1483. <https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2042623>.