

EVALUACIÓN DE INTEROPERABILIDAD DE SOFTWARE OPEN SOURCE BIM PARA EL REGISTRO DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO EN LA CAPILLA DE SAN PEDRO DE CHALLAPAMPA, PERÚ^[*]

INTEROPERABILITY ASSESSMENT OF OPEN SOURCE BIM SOFTWARE FOR DOCUMENTING ARCHITECTURAL HERITAGE IN THE CHAPEL OF SAN PEDRO DE CHALLAPAMPA, PERU

JORGE VILLEGAS ABRILL^[**]

EYMMI PROVINCIA CATAORA^[***]

ANA MIZRAHY CUPERSCHMID^[**]

ID <https://orcid.org/0000-0002-1155-0214> ID <https://orcid.org/0000-0002-1155-0214> ID <https://orcid.org/0000-0002-6792-174X>
javillegas@unap.edu.pe eprovincia@est.unap.edu.pe cuper@unicamp.br
Universidad Nacional del Altiplano (Perú) Universidad Nacional del Altiplano (Perú) Universidade Estadual de Campinas (Brasil)

Fecha de recepción: 21 de abril de 2024
Fecha de aprobación: 29 de diciembre de 2024

RESUMEN

La capilla de San Pedro de Challapampa, un ejemplo de arquitectura renacentista del siglo XVI, combina técnicas locales y modelos hispanos del altiplano peruano. Declarada patrimonio cultural en 1972, ha sido intervenida en 1974, 2002, 2014 y 2023. Este estudio evalúa el uso de software open source BIM para documentar el edificio con enfoque HBIM, analizando la capacidad del software en el registro de la edificación. Se utilizó el método de análisis de casos bajo enfoque de prueba de conformidad de intercambio de datos en formato IFC. A pesar de limitaciones con clases IFC específicas, se registraron elementos clave y se identificaron alteraciones en el edificio. Se concluye que la información fue interoperable, importándose a otros programas de lectura IFC y que el modelo permite el análisis y la toma de decisiones para la gestión del edificio, pero se requieren más estudios para evaluar la efectividad del software.

PALABRAS CLAVE

Conservación de monumentos; bien cultural; modelo virtual; BIM

ABSTRACT

The Chapel of San Pedro de Challapampa, an example of 16th-century Renaissance architecture, combines local techniques and Hispanic models from the Peruvian highlands. Declared a cultural heritage site in 1972, it has undergone interventions in 1974, 2002, 2014, and 2023. This study assesses the use of open source BIM software for documenting the building with an HBIM approach, analyzing the software's capability in the building's record. The methodology employed was the analysis of use cases under a data exchange conformity test approach in IFC format. Despite limitations with specific IFC classes, key elements were recorded, and alterations in the building were identified. The study concludes that the information was interoperable, being imported into other IFC reading programs, and that the model facilitates analysis and decision-making for building management. However, further studies are required to evaluate the software's effectiveness.

KEYWORDS

Conservation of monuments; cultural heritage; virtual model; BIM

(*) Esta investigación se desarrolla a iniciativa de los autores tomando como base de información la ejecución del mantenimiento de la capilla de Challapampa realizada por la Dirección Desconcentrada de Cultura de Puno en el año 2023.

(**) Docente en la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, imparte cursos de Historia de la Arquitectura y Gestión del Patrimonio. Magíster en Ordenamiento Territorial, coordina la Maestría en Arquitectura y asesora investigaciones en pregrado y postgrado.

(***) Egresada de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, especializada en documentación digital de patrimonio cultural. Modeló petroglifos de Salcedo, participó en la estrategia Defensores del Patrimonio y asistió en el mantenimiento de la capilla de Challapampa.

(****) Docente en la Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP). Doctorado y posdoctorado en Brasil. Investiga tecnologías digitales en arquitectura, especialmente BIM para patrimonio cultural y aplicaciones de realidad virtual en construcciones.

Introducción

La gestión del patrimonio cultural en el Perú está regulada por la Ley General del Patrimonio Cultural de la Nación (Ministerio de Educación, 2006) y por su reglamento que especifica que el patrimonio arquitectónico está constituido por todos aquellos edificios de factura colonial y republicana. Su registro y protección es preocupación constante, dado que muchos de los inmuebles patrimoniales se encuentran en proceso de deterioro y en condición de vulnerabilidad y expuesta a su posible pérdida definitiva. El patrimonio inmueble, ya sea arqueológico o histórico, ubicado en espacios rurales se encuentra en situación aún más crítica, pues solo se tiene catalogado y registrado aproximadamente el 1 % del total de bienes que el Ministerio de Cultura calcula tener en el Perú (Negro, 2019). El objetivo del registro de un bien cultural es preservar su imagen y su historia, con el fin de garantizar su conservación y por ello su permanencia a través del tiempo (Ministerio de Cultura, 2017; Tolentino, 2016).

En Perú, muchos bienes de valor histórico aún no han sido documentados de manera adecuada. Aquellos que han sido registrados generalmente cuentan con información en formato físico, la cual está sujeta a un constante deterioro y resulta ser de uso limitado y rígido. Con la finalidad de optimizar los procesos de documentación patrimonial, el enfoque de modelado de información de edificaciones patrimoniales (HBIM, por sus siglas en inglés) ha sido implementado como una estrategia que no solo favorece la gestión de bienes culturales, sino que también fortalece su conservación y sostenibilidad a largo plazo (Godinho et al., 2020). Derivado de la aplicación de la metodología BIM al ámbito del patrimonio, el HBIM comparte principios y objetivos similares, orientándose al modelado detallado de edificaciones para su registro exhaustivo. Asimismo, apoya los procesos de intervención y restauración de inmuebles históricos, posibilitando una gestión integral a lo largo de todo su ciclo de vida. Este enfoque incorpora también el análisis del comportamiento ambiental de las estructuras, promoviendo condiciones de preservación óptimas y sostenibles. Así, el HBIM se consolida como una herramienta esencial para la documentación, conservación y gestión eficiente del patrimonio construido, propiciando una comprensión profunda y estrategias de preservación efectivas (Arenas & Shafique, 2023; Bernard et al., 2013; Ford et al., 2013; Logothetis et al., 2015).

En el marco de la adopción del HBIM, los recursos de código abierto (OS, por sus siglas en inglés) han emergido como alternativas dinámicas, destacándose herramientas como Bonsai (anteriormente conocido como BlenderBIM) y FreeCAD. Estas plataformas ofrecen soluciones accesibles y adaptables, adecuadas para una documentación rigurosa y precisa de edificaciones históricas. Además, facilitan la catalogación sistemática, el registro y la gestión eficiente del patrimonio cultural, promoviendo enfoques sostenibles que pueden adaptarse a diversas necesidades y contextos específicos. La adopción de softwares de código abierto en el ámbito del HBIM impulsa la colaboración interdisciplinaria y el intercambio de conocimientos, contribuyendo a la innovación y al perfeccionamiento de las prácticas de conservación y gestión patrimonial (Diara, 2022; Diara & Rinaudo, 2018). Caracterizados por su acceso libre y universal, estos softwares se presentan como una opción viable tanto para entidades públicas y privadas como para propietarios individuales de inmuebles, representando una alternativa frente a los elevados costos de las licencias de softwares comerciales especializados. Esta accesibilidad favorece la eliminación de barreras financieras y promueve una gestión patrimonial más inclusiva y equitativa, posibilitando que un mayor número de organizaciones y usuarios accedan a herramientas avanzadas para la documentación y administración del patrimonio cultural.

No obstante, pese a las ventajas señaladas, el uso de software de código abierto (OS-BIM) también enfrenta limitaciones, especialmente en lo que respecta al intercambio de información. Esta problemática no es exclusiva de las soluciones OS-BIM, sino que también afecta a las plataformas BIM comerciales. En proyectos de edificación, la participación de múltiples disciplinas —como arquitectura, ingeniería estructural, ingenie-

ría mecánica, eléctrica y sanitaria— implica el uso de diversos programas especializados, lo que complica la integración y compatibilidad de los datos generados. Aunque los softwares pertenecientes a un mismo fabricante tienden a mostrar mayores niveles de interoperabilidad, resulta fundamental considerar opciones tecnológicas que se ajusten a los objetivos específicos de cada proyecto, ya que los desafíos de compatibilidad e intercambio de datos persisten. Esta fragmentación en el ecosistema de herramientas dificulta la coordinación interdisciplinaria, afectando la fluidez del trabajo colaborativo necesario para el éxito de los proyectos BIM (De Gaetani et al., 2020).

La capacidad de intercambiar información entre sistemas, conocida como interoperabilidad, se define como la aptitud de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizarla de forma efectiva. En el entorno actual del modelado de información para la construcción (BIM, por sus siglas en inglés), esta interoperabilidad se sustenta en el formato *industry foundation classes* (IFC), descrito como “una representación digital estandarizada del entorno construido, incluyendo edificaciones e infraestructura civil, diseñada para ser independiente de proveedores y compatible con una amplia gama de dispositivos, plataformas de software e interfaces para múltiples casos de uso” (Building Smart International, 2024). Gracias a este esquema de intercambio universal, es posible superar las barreras de compatibilidad, facilitando la colaboración y coordinación entre diversas especialidades involucradas en proyectos de construcción complejos. Sin embargo, los archivos IFC presentan la limitación de no conservar la parametrización original de los modelos, restringiendo la capacidad de edición de los elementos parametrizados, función disponible únicamente mediante el uso de archivos nativos de los respectivos programas de diseño.

El software de código abierto Blender, orientado al modelado de objetos tridimensionales, ofrece una plataforma integral que abarca la creación de elementos estáticos y dinámicos en 3D. Sus herramientas avanzadas incluyen el modelado a partir de nubes de puntos, técnica que incrementa la precisión en la representación geométrica del inmueble basado en relevamientos arquitectónicos. Asimismo, Blender incorpora funcionalidades de edición de video, generación de efectos visuales, composición, texturizado y simulaciones de diverso tipo, lo que lo convierte en una opción versátil y robusta para profesionales que trabajan en la creación de modelos geométricos y de información tridimensional (Blender Foundation, 2024). En años recientes, Blender ha evolucionado significativamente, expandiendo sus aplicaciones hacia el ámbito del modelado arquitectónico y, más específicamente, hacia el entorno BIM mediante el desarrollo del complemento Bonsai. Este *add-on* permite el intercambio de información de edificación utilizando el formato IFC. Sin embargo, resulta necesario profundizar en el estudio de su desempeño, tanto en términos de exportación de datos como en la recuperación de información importada desde otros programas BIM, a fin de evaluar su efectividad en la integración de flujos de trabajo, garantizando la interoperabilidad y la precisión en la gestión de datos arquitectónicos, estructurales y de sistemas de instalaciones.

La presente investigación tiene como objetivo analizar la capacidad del complemento Bonsai para gestionar la interacción entre componentes geométricos BIM en el proceso de registro del patrimonio construido, con un enfoque específico en el caso del templo de Challapampa, en Perú. A pesar de la aparente simplicidad de este edificio católico rural, la diversidad de elementos arquitectónicos y constructivos y los atributos asociados a ellos hacen que el desarrollo BIM sea complejo, permitiendo someter a prueba la capacidad de Bonsai como herramienta HBIM. Por lo tanto, el potencial de Blender como herramienta BIM requiere ser aplicado en un caso de estudio para evaluar sus ventajas y limitaciones.

La capilla San Pedro de Challapampa: ejemplo de arquitectura religiosa rural en el altiplano altoandino

La capilla de San Pedro se encuentra en el centro poblado mayor de la comunidad de Challapampa, dentro del distrito de Juli, provincia de Chucuito, en el departamento

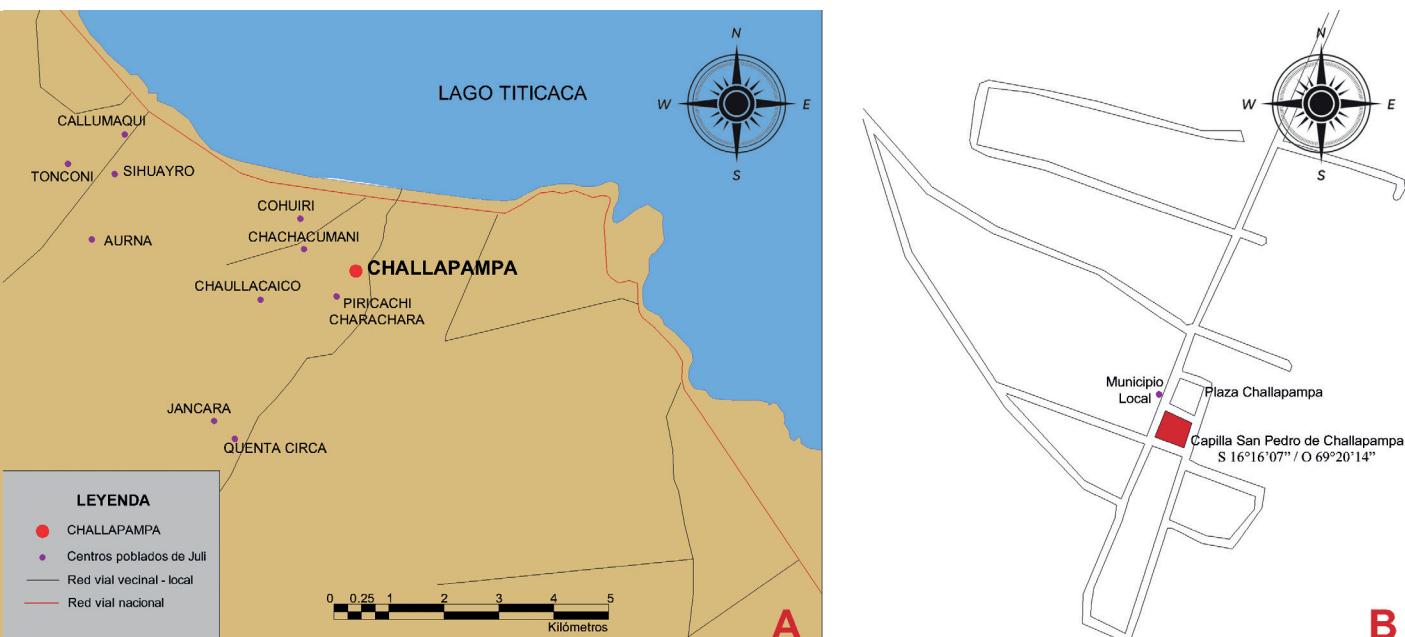


Figura 1. Ubicación del centro poblado Challapampa (A) y de la capilla de San Pedro (B).

de Puno, a una altitud de 3,875 metros sobre el nivel del mar. Situada al sur de la plaza principal, sus coordenadas geográficas son 16°16'07" de latitud sur y 69°20'14" de longitud oeste (ver Figura 1). El templo está emplazado en un área total de 814,50 metros cuadrados, de los cuales 177,24 metros cuadrados corresponden al área construida, mientras que el espacio restante se compone de tres atrios abiertos.

La capilla dedicada a san Pedro apóstol en Challapampa constituye un ejemplo destacado y representativo de la arquitectura mestiza que emergió a finales del siglo XVIII. A pesar de que su diseño arquitectónico, caracterizado por la simplicidad y la inclusión de rasgos renacentistas, sugiere una posible construcción en épocas anteriores, específicamente durante las fases iniciales del virreinato peruano, la carencia de documentación histórica precisa ha dificultado a los estudiosos establecer una datación exacta del edificio. La estructura de la capilla está conformada por materiales vernáculos, tales como piedra, adobe, madera y paja, los cuales eran comunes en las edificaciones de la región durante ese periodo. Esta edificación no solo se destaca por haber sido la sede de la viceparroquia de Challapampa, lo que le otorga un significativo valor histórico, sino que también resalta por su expresión arquitectónica y su notable valor artístico. La integración de elementos estilísticos y constructivos propios de la tradición mestiza en su diseño hace de la capilla una construcción de gran relevancia, ya que refleja la confluencia de influencias indígenas y españolas, así como las adaptaciones locales a los recursos y técnicas disponibles. Por estas razones, la capilla de san Pedro apóstol es considerada una de las obras más significativas de la arquitectura mestiza de su tiempo, tanto por su función religiosa e institucional como por su impacto estético y cultural en la región. Según historiadores, la capilla parece haberse construido entre finales del siglo XVIII y la primera década del siglo XIX, aunque no se tiene registro exacto de su edificación (Gutiérrez & Benavides, 1979), la configuración del edificio podría permitir establecer algunas hipótesis y ahí radica la importancia de Challapampa, porque su arquitectura contiene algunas características que describen la arquitectura religiosa rural durante el virreinato del Perú. La nave de la iglesia se emplaza paralela a la plaza del pueblo y por eso su acceso es tangencial al frontis por medio de un atrio frontal con accesos hacia la plaza y también hacia la calle lateral. El edificio, además del atrio frontal, está flanqueado por atrios laterales que la rodean y hacia el muro testero se tiene un espacio reducido hacia un muro perimetral de adobe que la rodea por completo y termina por configurar el conjunto y aísla el predio.

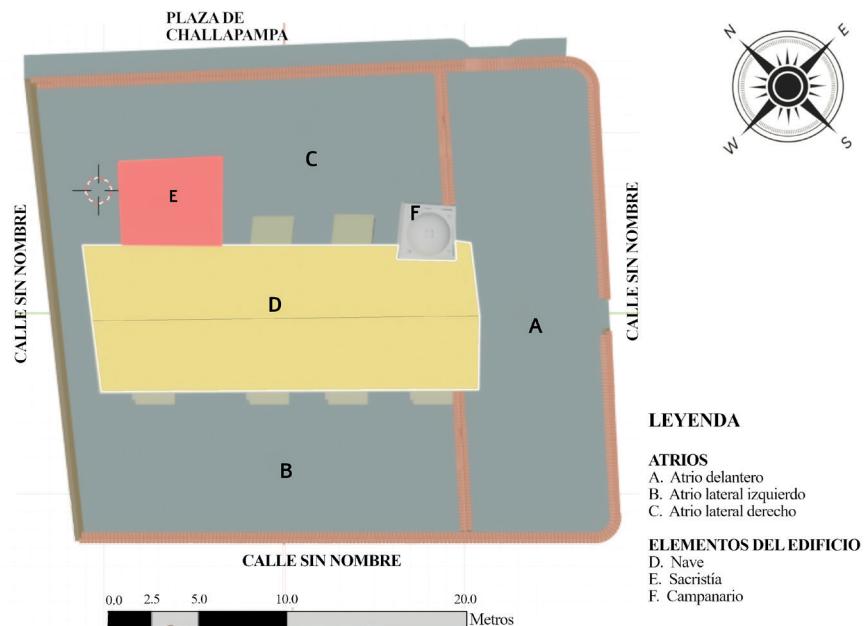


Figura 2. Zonificación del Templo de Challapampa

Desde el punto de vista espacial, el diseño interior se estructura en torno a la nave central, que actúa como el espacio principal ordenador. Lateralmente, se encuentran los espacios complementarios, como el acceso a la torre lateral ubicada cerca de la puerta de entrada en el muro de la epístola, la torre está construida en piedra con factura rústica. En el mismo muro, pero cerca del altar, se accede a la sacristía. En el lado opuesto, en el muro del evangelio, se encuentra una ventana única que proporciona luz directa al altar, junto con una puerta de reducidas proporciones que conduce al atrio lateral sur (ver Figura 2).

La arquitectura de la capilla se define por la utilización de muros construidos con piedra y adobe, y una cubierta formada por estructuras de par y nudillo con madera sólida de eucalipto, cubierta con paja ichu sobre una base de torta de barro. Un aspecto distintivo del edificio es la transición en sus muros, donde la construcción comienza con piedra hasta alcanzar alturas variables, para luego continuar con albañilería de adobe. Esta disposición sugiere un proceso constructivo realizado en etapas sucesivas, aunque esta hipótesis requiere ser respaldada por evidencias adicionales.

Destaca en la composición volumétrica la única torre del campanario, hacia la derecha del muro de pies y dividida en tres cuerpos por cornisas de laja de piedra que regulan sus proporciones. La torre es de piedra enteramente y coronada por cúpula de piedra y adornada con alfiles simples (ver Figura 3).

La cubierta de la capilla de Challapampa es un ejemplo significativo del sistema constructivo de par y nudillo, un método ampliamente utilizado en los territorios andinos durante el virreinato español sudamericano. Este sistema constructivo, caracterizado por la unión de pares y nudillos para formar una estructura estable para las cubiertas, fue común en la arquitectura de la región durante ese periodo histórico. Actualmente, este tipo de estructura de techo se encuentra en proceso de desaparición en los andes del Perú (Mamani Fuentes, 2022), lo que confiere a la cubierta de la capilla un valor histórico y patrimonial notable. La preservación de esta técnica en la capilla de Challapampa no solo proporciona información valiosa sobre las prácticas constructivas tradicionales, sino que también resalta la importancia de conservar y estudiar estos métodos ancestrales que forman parte del legado arquitectónico andino. El sistema



Figura 3. Vista del frontis desde el atrio principal

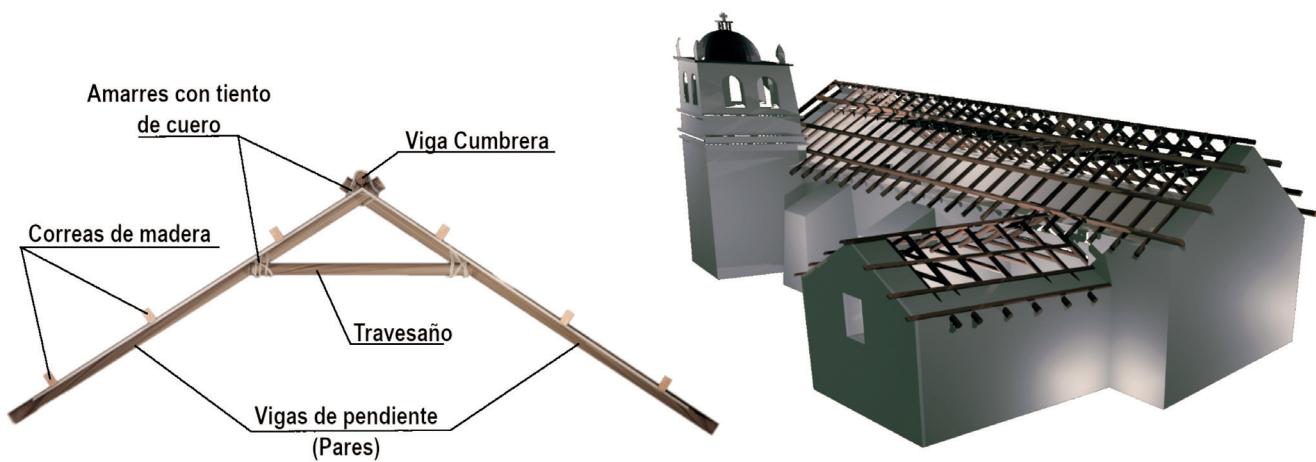


Figura 4. Modelo BIM de estructuras de cubierta de la nave y la sacristía de la capilla de San Pedro de Challapampa y detalle de estructura de par y nudillo

consiste en dos maderos inclinados que definen la pendiente de la cubierta (pares) y un travesaño de madera en sentido horizontal que los une generalmente a mitad de los pares. Los pares y los nudillos actuales son de rollizos de eucalipto. Todos estos elementos son amarrados con tientos de cuero de llama de aproximadamente 1 centímetro de grosor¹ (Barbarich & Tomasi, 2021). Los tientos se amarran siendo remojados en agua y al secarse se contraen dando rigidez a la estructura (ver Figura 4).

Otro aspecto notable es la composición del muro perimetral, que se construye con sobrecimientos de piedra y muros de adobe. En la parte superior, las piezas de albañilería están dispuestas en cruz inclinada, lo que crea una textura estética única que resalta la sensibilidad artística del hombre andino en el uso de materiales locales. Además, el

1. Los tientos de cuero de animal son remojados en agua para lograr trabajabilidad pero, cuando se secan se contraen y dan rigidez al amarre. Durante el virreinato en el altiplano la práctica común fue usar cuero de llama aun después de la llegada de ganado bovino al Perú. Actualmente es usado el cuero bovino.

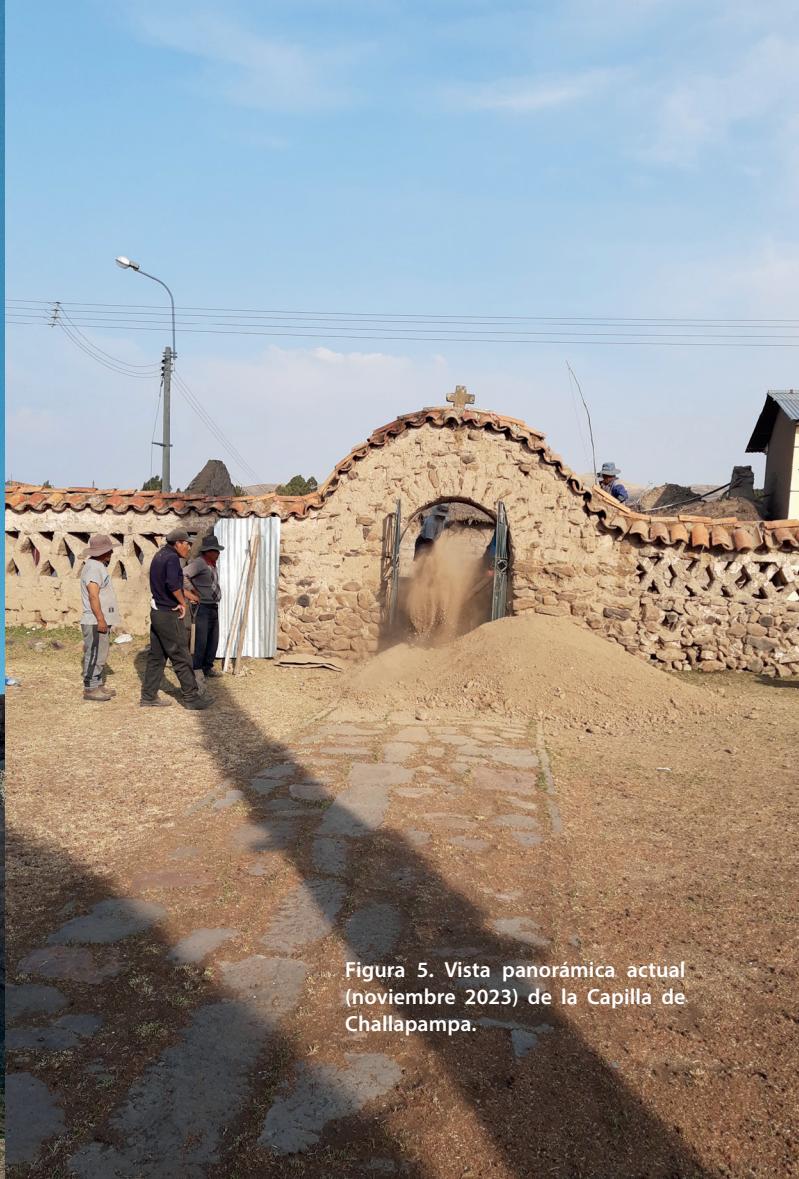


Figura 5. Vista panorámica actual (noviembre 2023) de la Capilla de Challapampa.



Figura 6. Vista del interior de la capilla de Challapampa. B: Detalle del retablo. Nota. La Figura 6a es adaptada de *Compañías militares de ángeles en la cultura visual hispánica durante la Edad Moderna*, por E. González Fernández, 2017, <https://idus.us.es/items/c09e7e51-3ad4-4493-9d62-34c654c5f58e>.

muro perimetral está rematado en su parte superior con tejas de cerámica, formando una cubierta a dos aguas con cumbreña del mismo material, lo cual funciona como un elemento de protección adicional y contribuye a la estética general del conjunto arquitectónico (ver Figura 5).

La sobriedad del espacio interior se ve compensada con la ornamentación. Originalmente la capilla acogió 13 cuadros de la serie Ángeles Arcabuceros realizados por el artista Jesuita Bernardo Bitti (González, 2017). Del mismo artista es el retablo que brinda fondo al altar, realizado en madera, atado o tauca de maguey y tela (ver Figura 6). El altar encaja en la hornacina hundida para ello sobre el muro testero y lleva como parte de su ornamentación el emblema de los jesuitas Iesu-Hominum Salvator (IHS) orden a la que perteneció Bitti. Por ello se puede pensar que el templo ya había estado construido o en proceso de estarlo para la segunda mitad del año 1567, fecha en que el rey Carlos III expulsó a los jesuitas de su reino. Es probable que en ese momento la capilla tuviese sus muros en piedra en proceso de fabricación y posterior a ello fueron completados con adobe.

La capilla de Challapampa se destaca como un ejemplo de la arquitectura virreinal rural en el altiplano altoandino, no solo por su estructura física, sino también por las expresiones artísticas que alberga, representando un temprano ejemplo del renacimiento andino. El edificio fue objeto de intervención en 1974 por parte del Instituto Nacional de Cultura, que llevó a cabo labores de restauración. En el año 2000, la cubierta de paja sufrió un colapso, pero fue restaurada en 2002. Este último año está tristemente marcado por el robo del retablo durante la intervención, el cual fue sacado ilegalmente del Perú y posteriormente encontrado en una galería en Estados Unidos. El retablo fue repatriado al Perú en 2006, destacándose como un evento significativo en la historia de la protección y conservación del patrimonio cultural del país (La Prensa, 2005). La intervención más reciente corresponde al año 2014 o 2015, cuando se realizaron trabajos de mantenimiento en cubiertas y muros del edificio; en octubre del 2023 se iniciaron trabajos de mantenimiento para cambio de la cobertura y reposición de piezas de adobe dañadas por malas condiciones climáticas.

HBIM, software open source e interoperabilidad

El HBIM consiste en el BIM aplicado al patrimonio histórico, incorporando sus particularidades (Tolentino, 2016). BIM se puede entender como una metodología de trabajo enfocada en la creación de un sistema de información para la gestión de proyectos de edificación en sus diferentes fases y componentes (Armisén Fernández et al., 2018).

Algunas definiciones se enfocan en el carácter interdisciplinario del BIM, definiéndolo como una metodología de trabajo colaborativo que usa modelos que se construyen a partir de informaciones coordinadas y consistentes (Tolentino, 2016). Esta última definición resalta el énfasis en la coordinación de diversos aspectos de un proyecto, lo que requiere flujos de intercambio de información constantes. Se puede establecer que BIM es un enfoque de trabajo integral y colaborativo con el objetivo de potenciar el logro de un proyecto de edificación haciendo uso de modelos de información unificados y completos del edificio sobre los que se desarrollan los distintos procedimientos de trabajo haciéndolos compatibles y eficientes (Sacks et al., 2018). En la industria de la construcción el uso de BIM permite optimizar la gestión de la información del proyecto, pero hay aún aspectos por mejorar antes de implementar un BIM frente a las dificultades que se presentan al momento de compartir información (Ford et al., 2013).

En la actualidad, los sistemas BIM están muy avanzados en su desarrollo, permitiendo múltiples tareas asociadas a la actividad constructiva y las edificaciones; sus ventajas incluyen lograr en menor tiempo y con mayor precisión la evaluación de alternativas, estimación de costos, cuantificación de materiales, gestión de datos, documentación de estado actual, análisis de avances de construcción, ejecución de planes y otras muchas actividades (Rocha et al., 2020). Existen variaciones en su uso según se aplique a proyectos y construcción de nuevos edificios o a la gestión de los ya existentes, como es el caso de los edificios patrimoniales. En el caso de edificios preexistentes es necesario documentar todos los componentes físicos y semánticos, y las actividades asociadas a la edificación para permitir una metodología basada en sistemas digitales.

En HBIM, cada proyecto de gestión del patrimonio requiere un modelado específico de sus sistema, lo importante es generar un soporte dinámico para planificar las acciones y niveles de intervención y dar a los diferentes especialistas involucrados una herramienta tridimensional que les permita la implementación de sus actividades de manera coordinada (Garramone et al., 2023). El modelo puede ser utilizado para una reconstrucción virtual de un patrimonio demolido (Cuperschmid et al., 2024), preservando su memoria; para realizar simulaciones de Building Energy Modeling (BEM), con el fin de garantizar el confort térmico de la edificación (Costa et al., 2024); o también para la difusión del patrimonio, permitiendo visitas virtuales (Cuperschmid & Dias, 2024). Por lo tanto, los sistemas HBIM suelen ser usados con varios propósitos: para el modelado de las condiciones del edificio tal cual existe en la realidad, para la reconstrucción hipotética de las condiciones físicas originales del edificio, o para la gestión del objeto con valor cultural integrando sus componentes físicos con los valores semánticos contenidos en el edificio (Delpozzo & Balletti, 2023).

La aplicación del BIM al patrimonio implica capacidad para integrar datos que documenten las peculiaridades históricas, materiales, estructurales de los edificios con valor histórico (Scandurra & di Lugo, 2023). A pesar de la diversidad de posibilidades de aplicación de HBIM, la mayoría de las aplicaciones centran su interés en el campo de la evaluación estructural en el modelado como forma de registro del patrimonio (Silva & Cuperschmid, 2022). A ello debemos sumar el creciente interés en estudiar los métodos más efectivos para reconocer, prevenir y analizar las patologías que pueden afectar los elementos y materiales de construcción (Borin & Cavazzini, 2019; Oostwegegel et al., 2022; Pocabelli et al., 2018; Rebec et al., 2022).

Bonsai: software OS para el desarrollo de proyectos HBIM

En el ámbito del modelado del patrimonio y la ejecución de proyectos de construcción bajo la metodología BIM resulta habitual la utilización de softwares comerciales desarrollados por empresas especializadas. Entre las herramientas más reconocidas y empleadas por los profesionales de arquitectura, ingeniería y construcción (AEC, por sus siglas en inglés) destacan Autodesk Revit y Graphisoft Archicad, ampliamente consolidadas en el sector. Estos programas posibilitan la creación de modelos digitales detallados que

optimizan la planificación, el diseño y la gestión integral de los proyectos constructivos (López et al., 2018). Sin embargo, tanto Autodesk Revit como Graphisoft Archicad operan bajo licencias propietarias, cuyos costos pueden representar un obstáculo significativo para individuos y entidades vinculadas a la gestión del patrimonio, incluyendo organismos públicos. Frente a esta situación, se plantea la necesidad de evaluar alternativas basadas en softwares de código abierto, como Blender, complementado con el *add-on* Bonsai.

Las principales funcionalidades de Blender pueden organizarse en torno a diversas aplicaciones específicas:

- Modelado 3D: Blender ofrece a los usuarios herramientas robustas para la creación de modelos tridimensionales de objetos, personajes y entornos, abarcando técnicas de modelado poligonal, subdivisión de superficies, esculpido digital y modelado paramétrico.
- Animación: El *software* posibilita la animación de objetos y personajes mediante distintas metodologías, incluyendo animación por fotogramas clave, *rigging* (asignación de esqueletos a modelos), así como simulaciones físicas y de partículas.
- Renderizado: Incorpora motores de renderizado internos capaces de generar imágenes y animaciones fotorrealistas, soportando tecnologías avanzadas como iluminación global, materiales *physically based rendering* (PBR) y trazado de rayos o *ray tracing*.
- Simulaciones: Blender integra herramientas que permiten la creación de simulaciones físicas, tales como dinámicas de fluidos, tejidos, partículas, humo y fuego.
- Composición y efectos visuales: Dispone de un editor de nodos que facilita la composición de imágenes y efectos visuales, posibilitando procesos de postproducción y mejora de imágenes renderizadas.
- Escultura digital: Ofrece capacidades de esculpido digital para la generación de formas orgánicas complejas y texturas altamente detalladas.
- Animación 2D: Además del entorno tridimensional, Blender admite la creación de animaciones en dos dimensiones.

Blender se presenta como una herramienta versátil y de gran potencia, cuya adopción ha crecido considerablemente dentro de la comunidad de gráficos 3D, debido a su carácter gratuito, su modelo de código abierto y el dinamismo de su desarrollo impulsado por una amplia comunidad de colaboradores. El *software* está disponible en múltiples plataformas, incluyendo Windows, macOS y Linux, ampliando así su accesibilidad a una diversa comunidad de artistas y creadores 3D.

En el campo de la arquitectura, la incorporación de Blender se vincula al surgimiento del denominado Movimiento de Arquitectura de Código Abierto (OSArc), iniciado durante la década de 1990, el cual promueve principios de acceso libre y colaboración abierta para el diseño arquitectónico. Según su manifiesto, se considera a la arquitectura de código abierto como un nuevo modelo en ascenso que toma influencias de diferentes ámbitos, como la cultura del código abierto, las corrientes vanguardistas en arquitectura, la ciencia ficción, la teoría lingüística y más. Este enfoque abarca el diseño espacial de manera inclusiva, la colaboración en el uso de *software* de diseño y la gestión transparente en todas las etapas de vida de un edificio (Ratti & Claudel, 2015).

Los usos de Blender en arquitectura son variados y, a pesar de no ser un *software* especializado en la rama AEC, en los años recientes ha ganado gran aceptación por la versatilidad de sus herramientas y por el desarrollo de herramientas complementarias, conocidas como *add-ons*, con funciones específicas, que aumentan sus capacidades. Justamente una extensión orientada a la industria AEC es la denominada Bonsai, desarrollada por la comunidad Blender.org con código escrito en la plataforma IfcOpenShell (buildingSMART community, 2024) y con el respaldo de la comu-

nidad OSArch. Se debe indicar que para la modelación en Blender es posible utilizar diversas bibliotecas de elementos tridimensionales disponibles en internet, que pueden ser importados en formatos variados como .obj, .dae, .fbx, .stl, entre otros; sin embargo, es importante destacar que estas bibliotecas no suelen incluir componentes parametrizados. Esto significa que los modelos tridimensionales disponibles no permiten modificar los valores de sus parámetros para adaptarse a las necesidades específicas de otros proyectos. En consecuencia, los usuarios deben trabajar con modelos fijos que no ofrecen la flexibilidad necesaria para ajustar dimensiones u otras propiedades para diferentes aplicaciones, esto es de especial atención para el caso de modelamiento del patrimonio edificado, pues más que parametrización se requiere flexibilidad y capacidad de adaptación de las herramientas de registro según los requerimientos particulares de cada caso.

Interoperabilidad de la información HBIM

El desarrollo y la utilidad de Bonsai son crecientes. En el año 2020 fue galardonada como ganadora en el programa de premios BuildingSmart en la categoría de tecnología (Lendlease, 2020), pero a pesar de ello aún no es muy difundida entre la comunidad profesional. Uno de los aspectos que podría estar limitando su uso es el de la interoperabilidad de la información generada en Bonsai o importada hacia el software. Se trata de un problema que no solo afecta a Bonsai sino que es un problema general en el área AEC.

La interoperabilidad, objeto de estudio de este trabajo, es definida como la capacidad que puedan tener dos o más sistemas o componentes de sistemas para intercambiar información y utilizar la información que ha sido intercambiada (De Gaetani et al., 2020). Para el desarrollo de proyectos bajo enfoque BIM, la interoperabilidad resulta crucial, puesto que permite evitar la redundancia o repetición de datos, lo que a su vez prolonga los tiempos de desarrollo. En general, la interoperabilidad permite eficiencia en la gestión de la información promoviendo continuidad en el flujo de trabajo (Sattler et al., 2021).

Los problemas de falta de interoperabilidad surgen debido a que el desarrollo de proyectos de edificación, nueva o de interés histórico, es una actividad que requiere de la participación de múltiples disciplinas y los profesionales de cada una de ellas suelen usar softwares propios de su área que, la mayoría de veces, tienen dificultades para transferir información para otras herramientas (De Gaetani et al., 2020). Una segunda causa es la falta de protocolos de intercambio de información que den uniformidad a los procesos, que eviten la redundancia de datos y la pérdida de información en el intercambio de datos (Tchouanguem Djuedja et al., 2019). Para resolver este problema existe el esquema *industry foundation classes* (IFC) promovido por BuildingSMART International; se trata de un formato de archivo abierto y neutro que no es privativo de ningún software específico que permite representar de manera ordenada todas las informaciones, geométricas y semánticas, de un edificio durante todo su ciclo de vida (Sattler et al., 2021).

Materiales y métodos

Inicialmente se establecieron los requerimientos que debe cumplir el proyecto HBIM mediante conversaciones de coordinación con los responsables de la gestión del templo en la Oficina de Patrimonio Arquitectónico de la Dirección Desconcentrada de Cultura de Puno. Sobre la base de esa coordinación y tomando en cuenta los recursos logísticos con que se contó se establecieron los siguientes requerimientos:

- Nivel de representación: Se estableció que se generaría una representación geométrica 3D general de elementos constructivos del recinto edificado sin llegar a registrar detalles decorativos ni bienes muebles contenidos en el templo.

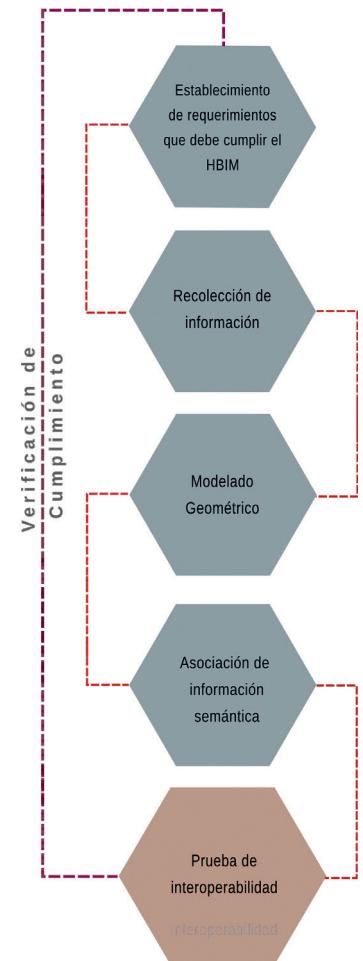


Figura 7. Secuencia metodológica de la investigación

- Escalabilidad: Se requirió que en proyecto fuesen modelados componentes de diferentes tamaños y niveles de detalle, procurando enfatizar los componentes con valor histórico más relevantes.
- Anotaciones y metadatos: El modelo HBIM debería permitir la adición de anotaciones y metadatos que puedan describir y documentar aspectos específicos de los elementos constituyentes del edificio.
- Visualización y presentación: Se estableció que el proyecto debería permitir la visualización y presentación efectiva de la información en formatos accesibles para diferentes usuarios, mediante el uso de visualizadores BIM gratuitos.
- Datos históricos: Se requirió proporcionar una representación de la estructura en dos momentos, anterior y posterior a la reforma realizada el año 2015, para mostrar cambios a lo largo del tiempo.

La recolección de la información se realizó durante el mes de setiembre del 2023, se llevó a cabo un levantamiento arquitectónico del edificio de manera manual utilizando cintas de medición y distanciómetros láser de la marca Bosch modelo TC-LD 25. Al tiempo que se ejecutó el levantamiento y se generó un registro fotográfico del interior y del exterior del inmueble. Mediante fichas de registro se realizó el levantamiento de estado actual en cuanto a las patologías que sufre el edificio. Con esa información se realizó el replanteo de la información en formato digital.

El proyecto HBIM se elaboró en el *software* Blender versión 3.6.5 bajo licencia pública general de GNU. Se utilizó el *add-on* BlenderBIM en su versión 0.0.230902 de autoría de IfcOpenShell Contributors (desde agosto del 2024 cambió su denominación a Bonsai). La totalidad del desarrollo del modelo geométrico 3D, de la información 2D técnica generada y la asociación de la información semántica asociada se desarrolló con *software* libre Blender y sus complementos *open source*. La ejecución del trabajo se efectuó en las etapas mostradas en la Figura 7.

Para la evaluación de la interoperabilidad del modelo BIM generado con Blender se utilizaron cuatro visores gratuitos: BIMvision versión 2.27.7, BIMCollab ZOOM versión 7.1, Xbm Xplorer versión 4.0.0 y el visualizador IFC usBIM Accasoftware versión 2.5.53. Todos los *softwares* con los que se realizaron pruebas de interoperabilidad son de uso libre o versiones de prueba. No se empleó *softwares* con licencias restrictivas de uso.

Resultados y discusión

Geometría generada

Sobre la base de los planos del estado actual, se elaboró un modelo tridimensional del edificio y de sus tres atrios. Se consiguió realizar un registro HBIM que abarca todos los elementos constructivos del recinto, incluyendo los componentes arquitectónicos de cerramiento, como los muros, puertas, ventanas, pisos y cubiertas. Además, se documentaron los elementos estructurales de las cubiertas, que incluyen tijerales y correas de sujetación en las áreas de la nave, la sacristía y las cubiertas de los seis contrafuertes perimetrales. La geometría del conjunto modelado quedó compuesta por 539 objetos, los cuales se definieron utilizando 52,034 polígonos triangulares y 26,935 vértices (ver Figura 8). En el modelo HBIM se incluyeron las siguientes categorías IFC (ver Tabla 1):

El proceso de modelado HBIM en Blender se llevó a cabo siguiendo estos pasos (ver Figuras 9 y 10):

- Creación del proyecto bajo el esquema IFC4: Se estableció el proyecto utilizando el esquema estándar IFC4.

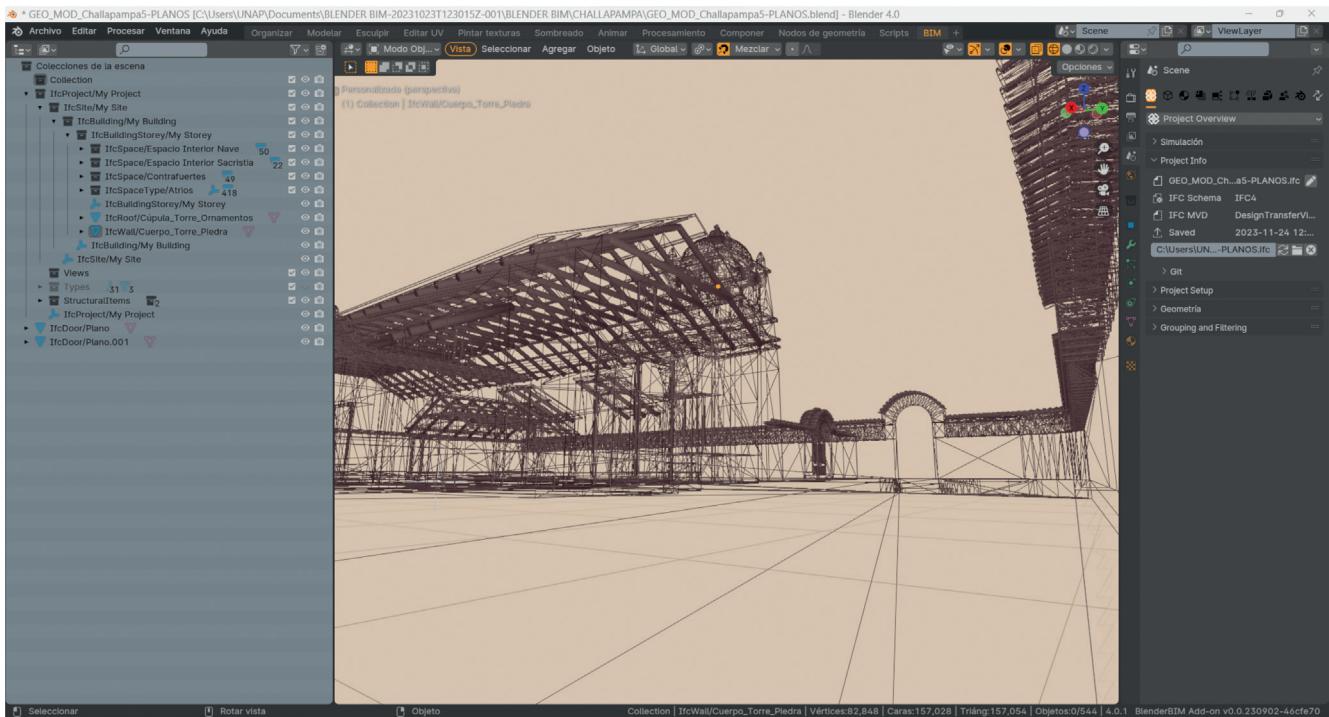


Figura 8. Estructura alámbrica del modelo generado con el entorno de Blender

Tabla 1. Categorías IFC generadas con BlenderBIM en el modelo 3D de la capilla de San Pedro de Challapampa

Categoría IFC	N.º de objetos
IfcSpace	5
IfcWall	5
Ifc Slab	2
Ifc ElementAssembly*	44
IfcDoor	5
IfcFurniture	2
IfcWindow	3
IfcBeam	56
IfcRoof	9
IfcStair	3
IfcCovering**	405
Total	539

Nota. * La categoría IfcAssembly incluye elementos compuestos, principalmente estructuras de techo a "par y nudillo".
** La categoría IfcCovering contiene principalmente las piezas de teja de los muros que limitan entre el atrio principal y los atrios laterales las cuales se modelaron una a una en piezas separadas.

- Creación de geometrías: Las geometrías se generaron basándose en los levantamientos de planos y los registros fotográficos.
- Asignación de tipos IFC a contenedores espaciales: Se asignaron tipos IFC adecuados a los diferentes contenedores espaciales del modelo.

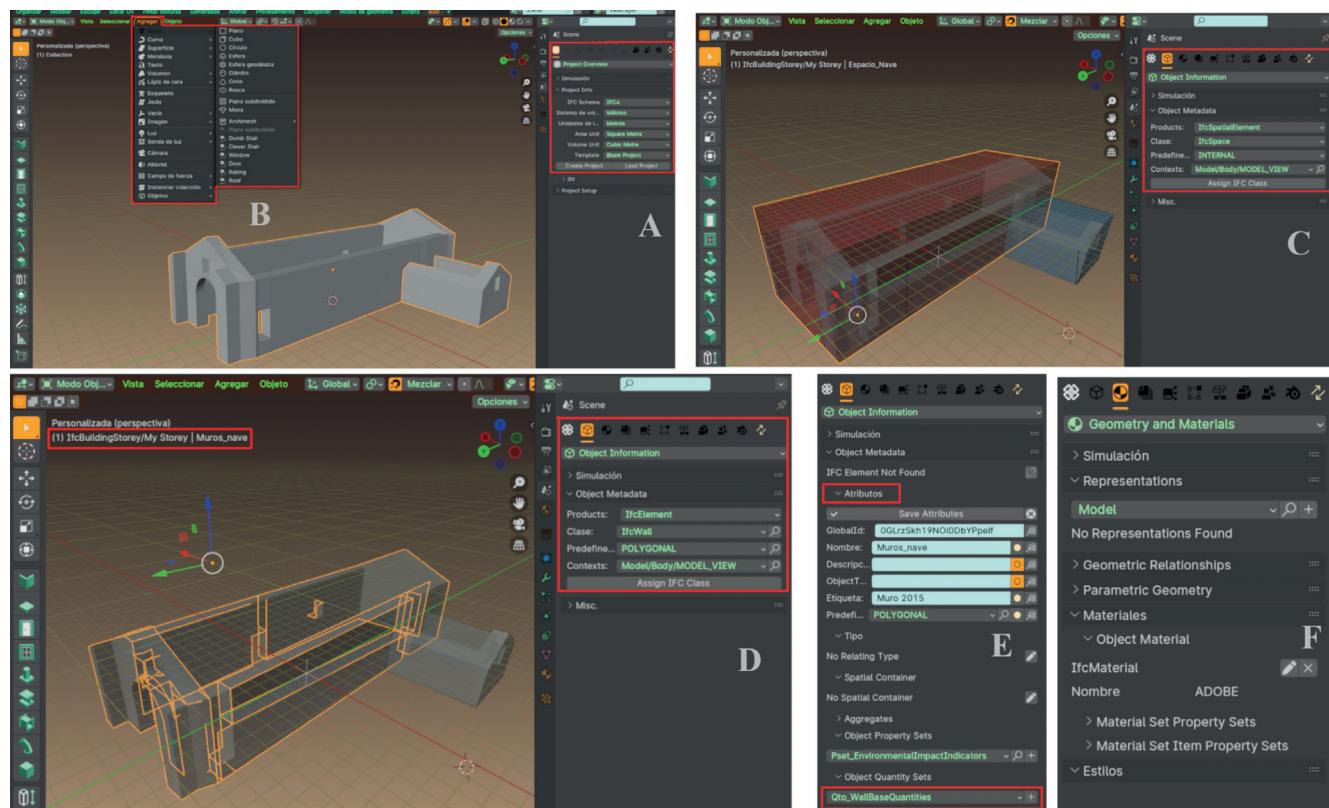


Figura 9. Proceso de modelado HBIM de la capilla de San Pedro de Challapampa bajo el entorno Bonsai. *Nota.* Los resultados con marcos rojos son de los autores.

- Asignación de clases y categorías IFC a las geometrías: Las clases y categorías IFC se asignaron a las geometrías correspondientes de los elementos constructivos.
- Asignación de atributos generales cualitativos y cuantitativos: Se incorporaron atributos generales tanto cualitativos como cuantitativos, incluyendo la asignación del año de construcción como etiqueta.
- Asignación de atributos de materialidad: Se añadieron los atributos relacionados con los materiales de los distintos elementos constructivos.

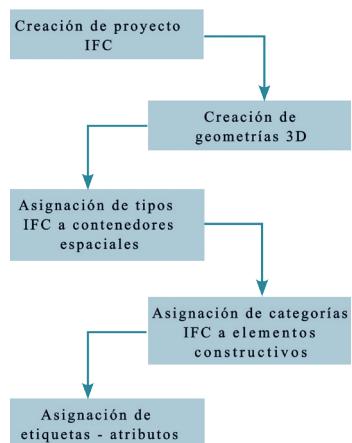
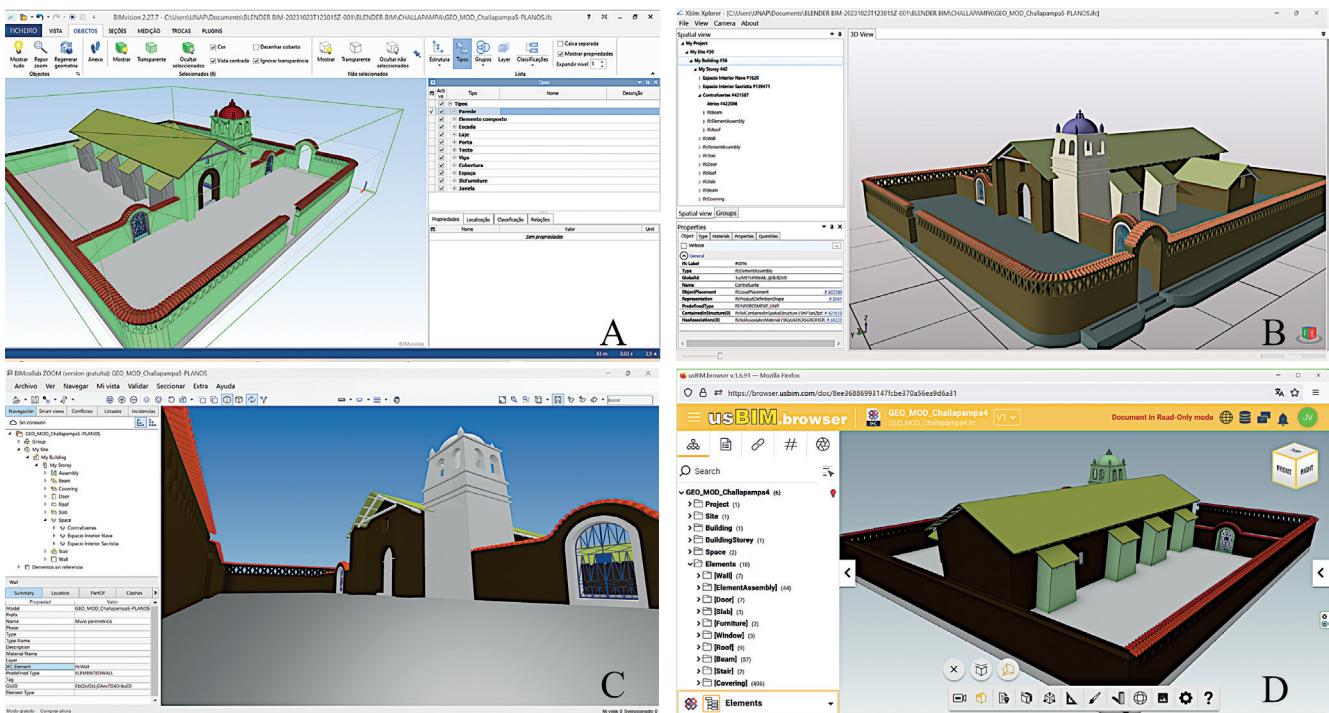


Figura 10. Esquema del flujo del proceso de modelado HBIM de la capilla de San Pedro de Challapampa en Bonsai

Pruebas de interoperabilidad

El modelo generado en formato IFC utilizando Bonsai fue exitosamente leído por los visores IFC sin presentar ninguna limitación. Se verificó que, además de la información geométrica, también se logró recuperar la información semántica asociada al modelo. Por ejemplo, los materiales de construcción asignados a todos los componentes constructivos y las dimensiones de las correas de madera en la cubierta de la nave, que fueron especificados en el modelo HBIM de Blender, se recuperaron de manera íntegra en los cuatro softwares empleados para la verificación. Es importante resaltar que en todos los casos se pudo comprobar la exactitud de la información semántica incorporada en los modelos, así como la estructura de datos organizada bajo la clasificación IFC establecida inicialmente. La Figura 11 ilustra los modelos recuperados; se puede observar que hay diferencias en la asignación de colores para cada elemento del modelo por parte de cada software; sin embargo, estas diferencias visuales no afectan ni a la geometría ni a la información semántica asociada en ninguno de los programas



de evaluación utilizados, siendo en algunos casos personalizable. Las diferencias de representación en cuanto a color son irrelevantes.

Se hace notar que, dado que es una primera aproximación al uso del *software* para el modelamiento y registro del patrimonio edificado, no se han realizado pruebas de interoperabilidad con otros *softwares* que permitan la edición de datos, y mucho menos con *softwares* de licencias restrictivas, pues lo que se busca es el libre acceso a los recursos tecnológicos en la disciplina bajo la filosofía *open source*.

Datos históricos

La asignación de etiquetas a los elementos representados correspondientes a los dos momentos de intervención ha permitido detectar una discrepancia entre los planos correspondientes a la obra de mantenimiento de cubiertas realizada en 2015 y la inclinación de los techos en la nave del edificio medida *in situ* en el año 2023. La diferencia en las pendientes es de 2.37 grados. La pendiente medida, que es superior a la del 2015, es de 26.9 grados (véase Figura 12). Hay dos posibles explicaciones para esta variación: una posibilidad es que la pendiente de la cubierta fue modificada durante la intervención de 2015, lo cual es probable, dado que también se alteró la cornisa interior formada por la cima de los muros laterales que no llegaba a elevarse hasta el ras de la parte interior de la cubierta (véase Figura 13), o bien pudo ocurrir que el replanteo de los planos finales de las obras de 2015 fue realizado incorrectamente. Cualquiera sea el caso existen alteraciones en el edificio que ya son parte de su proceso histórico.

El cambio, en la configuración de los muros laterales de la nave, que actualmente se elevan hasta intersectar con los pares de los tijerales de rollizo de madera, se considera una modificación sustancial. Esta alteración ha provocado dos cambios significativos en la estructura arquitectónica. En primer lugar, hay una transformación en la espacialidad. La separación entre los muros y la cubierta introduce una pauta visual que genera una sensación de ligereza y levedad en la cubierta, lo que afecta la percepción espacial del interior del edificio. Esta nueva configuración visual influye en cómo se experimenta el espacio

Figura 11. Capturas de pantalla de modelo HBIM en formato IFC recuperado por diversos *softwares* de visualización BIM



Figura 12. Captura de pantalla de Blender 3D mostrando la diferencia de pendientes en la cubierta de la nave de la capilla de Challapampa entre la intervención 2015 y el edificio actual

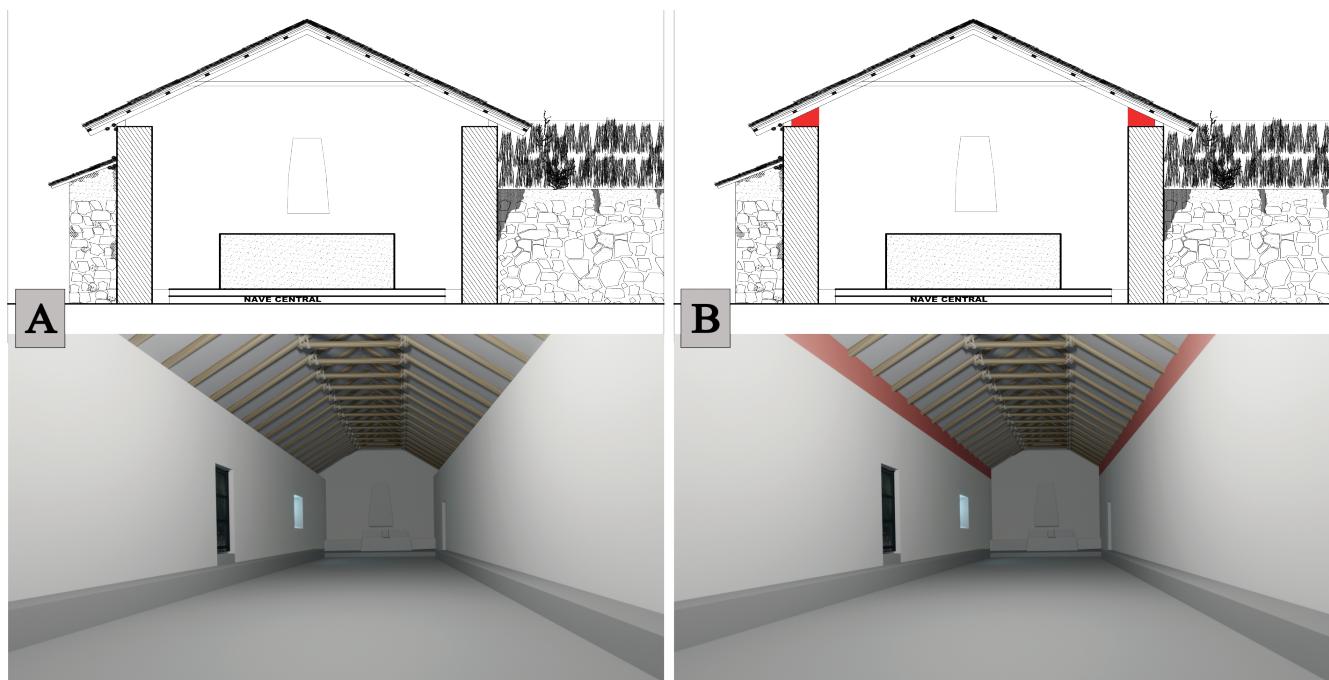
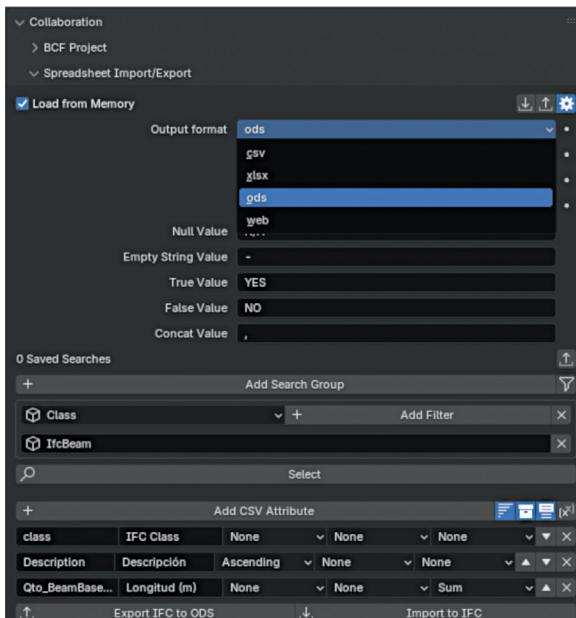


Figura 13. Corte y renderizado (vía Blender) del interior de la nave de la capilla de Challapampa mostrando la alteración del encuentro entre muros laterales de la nave y las estructuras de la cubierta

interno, aportando una mayor sensación de apertura y fluidez. En segundo lugar, existe una alteración estructural importante. El vacío resultante entre el muro y la cubierta exigía la implementación de un estribo o durmiente para asegurar el apoyo adecuado de la cubierta sobre el muro, previniendo desplazamientos horizontales indeseados. Este refuerzo estructural era necesario para mantener la integridad y estabilidad de la cubierta en su nueva configuración. Aún no se ha logrado determinar con precisión el momento histórico



IFC Class	Descripción	Longitud (m)	IFC Class	Descripción	Longitud (m)
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Correa 2x4"	21,078
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Correa 2x4"	21,224
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,415
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,429
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,458
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,029
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Correa 2x4"	21,151
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,304
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,415
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Correa 2x4"	21,419
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x3.5"	2,095	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x3.5"	5,507	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	2,525
IfcBeam	Correa 2x4"	21,304	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631
IfcBeam	Correa 2x4"	21,535	IfcBeam	Madera rolliza ø 3"	1,631

Sum: 372,249

en que se llevó a cabo esta modificación. Esta falta de documentación precisa deja abierta la cuestión sobre cuándo y por qué se realizó esta intervención arquitectónica, lo que podría ser un área de interés para futuras investigaciones históricas y arquitectónicas.

Un factor importante de las herramientas BIM es la capacidad que deben tener para generar información que permita explicar y, por lo tanto, gestionar los componentes del modelo. En este caso Bonsai pudo generar diversas informaciones a partir del modelo y la información semántica que se asoció a sus componentes. Para ello se utilizó el módulo Collaboration:Spreadsheet Import/Export de Bonsai, con ello y como ejemplo se generó una tabla de datos en formato ODS describiendo las características de todas las vigas de madera cortada y madera rolliza en la edificación de este módulo y el resultado obtenido se observa en la Figura 14.

Blender, aunque es una herramienta completa y potente, presentó algunas desventajas que pueden afectar su aplicación en el modelado del patrimonio. Su interfaz y la curva de aprendizaje pueden ser desafiantes para nuevos usuarios debido a la cantidad de funciones y la estructura de menús, lo cual puede dificultar su uso intuitivo. Además, los problemas de compatibilidad de archivos con otros programas de diseño pueden limitar la interoperabilidad, lo que es común a los softwares utilizados en el mercado, siendo este aspecto su mayor reto por ser algo fundamental en proyectos de patrimonio que requieren colaboración entre diversas plataformas.

Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación fue analizar la capacidad de Bonsai para manejar la interacción entre componentes geométricos BIM en el contexto del registro del patrimonio construido, específicamente en el templo de Challapampa en Perú. Esto implicó la evaluación de cómo Bonsai maneja la representación de materiales y la generación de información útil para la toma de decisiones en la restauración sostenible de monumentos históricos. Un aspecto crucial de esta investigación fue la medición de la interoperabilidad de Bonsai con otros softwares y formatos de datos utilizados en el campo del HBIM.

La estructura de datos lograda permite el registro de la información geométrica del edificio histórico y sus atributos generales pero se presentan limitaciones, dado que las cla-

Figura 14. Módulo Collaboration:Spreadsheet Import/Export de Bonsai con tabla de resultados de análisis de vuguería de madera en el modelo de la capilla de Challapampa

ses predefinidas del esquema IFC se orienta a elementos estructurales y arquitectónicos para edificaciones en general y no existen categorías específicas para elementos particulares de construcciones con carácter histórico como, por ejemplo, el tiento de cuero de animales utilizado en los amarres de elementos estructurales. Dado que el modelo desarrollado corresponde a una edificación histórica con elementos constructivos fuera de los estándares actuales de construcción, el uso de elementos paramétricos no resultó relevante. En este sentido, la elección del *software* Blender fue una ventaja, ya que su flexibilidad facilitó de manera sencilla la creación de geometrías distintivas para satisfacer la modelación de una capilla del renacimiento andino virreinal.

El modelo de datos BIM generado con Blender es interoperable, ya que la información geométrica y semántica generada ha podido ser recuperada sin problemas en los cuatro *softwares* elegidos. La estructura de datos bajo el formato IFC con que trabaja Bonsai permite la transferencia de información.

Este artículo contribuye a la discusión sobre el uso de *software* libre para el desarrollo de modelos HBIM, un tema que aún cuenta con una literatura limitada. Se ha comprobado su aplicabilidad para la modelación del patrimonio. Es importante señalar que el *software* Blender no opera de manera similar a los programas de modelado BIM más comunes, como Revit y Archicad, ya que estos últimos trabajan con familias de objetos, mientras que Blender maneja geometrías tridimensionales de forma independiente.

Los trabajos futuros se enfocarán en investigar las posibilidades de creación de nuevas clases IFC para adaptarse a los métodos constructivos de la época y su integración con Bonsai. Además, será necesario investigar otros casos de aplicación de este *software* en edificaciones de valor histórico con el fin de desarrollar un cuerpo significativo de conocimiento sobre el tema.

Agradecimientos

Se agradece al personal de la Oficina de Patrimonio Arquitectónico de la Dirección Desconcentrada de Cultura de Puno, por permitir el acceso a la información en la que se basa esta investigación.

Referencias

- Arenas, N. F., & Shafique, M. (2023). Recent progress on BIM-based sustainable buildings: State of the art review. *Developments in the Built Environment*, 15(100176), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100176>
- Armisén Fernández, A., Agustín, L., Benítez, Y., Coronel, A., Pérez de Prada, L., Alberto Alonso, J., Salvador, E., Lodeiro, J. M., Esteve, Á., Soria, E., Baena, L., Parra, R., Lara, R., Lorite, R., Ortiz, R., Angulo Fornos, R., Burgada Ereño, A., Castellano Román, M., Escribano, F., ... Soto, A. (2018). *BIM aplicado al patrimonio cultural*. <https://hdl.handle.net/11441/98914>
- Barbarich, M. F., & Tomasi, J. (2021). Los cardones en los tijerales. El uso de la madera de cactus columnares en el patrimonio arquitectónico de la Puna de Atacama (Susques, Jujuy, Argentina). *Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 33. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.apu33.ctmc>
- Bernard, A., Rivest, L., & Dutta, D. (Eds.). (2013). *Product Lifecycle Management for Society: 10th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2013, Nantes, France, July 6-10, 2013, Proceedings* (Vol. 409). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41501-2>
- Blender Foundation. (2024). *Blender 4.2 Manual*. Blender. <https://docs.blender.org/manual/en/latest/index.html>
- Borin, P., & Cavazzini, F. (2019). Condition assessment of rc bridges. Integrating machine learning, photogrammetry and BIM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 201-208. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-201-2019>

- Building Smart International. (2024). *Industry foundation classes (IFC)*. buildingSMART Technical.
<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>
- buildingSMART community. (2024). *Bonsai—Beautiful, detailed, and data-rich OpenBIM*. Bonsai.
<https://bonsaibim.org/>
- Costa, A. P., Cuperschmid, A. R. M., & Neves, L. O. (2024). HBIM and BEM association: Systematic literature review. *Journal of Cultural Heritage*, 66, 551-561. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008>
- Cuperschmid, A. R. M., & Dias, M. S. (2024). Valuing and Sharing Contemporary Architectural Heritage: Exploring the Scan-to-HBIM-to-XR Process with Veneza Farm Chapel. En C. Bartolomei, A. Ippolito, & S. H. T. Vizioli (Eds.), *Contemporary Heritage Lexicon. Springer Tracts in Civil Engineering*. (Vol. 1, pp. 109-127). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65104-5_6
- De Gaetani, C. I., Mert, M., & Migliaccio, F. (2020). Interoperability Analyses of BIM Platforms for Construction Management. *Applied Sciences*, 10(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/app10134437>
- Delpozzo, E., & Balletti, C. (2023). Bridging the gap: An open-source gis+bim system for archaeological data. The case study of Altinum, Italy. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, 491-498. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-491-2023>
- Diara, F. (2022). HBIM Open source: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090472>
- Diara, F., & Rinaudo, F. (2018). Open source HBIM for cultural heritage: A project proposal. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 303-309. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-303-2018>
- Ford, G., Bartley, T., Igba, J., Turner, A., & McMahon, C. (2013). Product Life Cycle Data Management: A Cross-Sectoral Review. En A. Bernard, L. Rivest, & D. Dutta (Eds.), *Product Lifecycle Management for Society* (pp. 58-67). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41501-2_7
- Garramone, M., Jovanovic, D., Oreni, D., Barazzetti, L., Previtali, M., Roncoroni, F., Mandelli, A., & Scaioni, M. (2023). Basilica di San Giacomo in Como (Italy): Drawings and HBIM to manage archeological, conservative and structural activities. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, 653-660. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-653-2023>
- Godinho, M., Machete, R., Ponte, M., Falcão, A. P., Gonçalves, A. B., & Bento, R. (2020). BIM as a resource in heritage management: An application for the National Palace of Sintra, Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.010>
- González, E. (2017). Compañías militares de ángeles en la cultura visual hispánica durante la edad moderna. IDUS. <https://idus.us.es/items/c09e7e51-3ad4-4493-9d62-34c654c5f58e>
- Gutierrez, R., & Benavides, B. E. (1979). *Arquitectura del altiplano peruano*. Universidad Nacional del Nordeste. Departamento de Historia de la Arquitectura.
- La Prensa. (24 de julio de 2005). *Devuelta a su hogar*. La Prensa. https://www.prensa.com/cultura/Devuelta-hogar_0_1523097725.html
- Lendlease. (2020). *A modular toolkit for developing openBIM data pipelines* [Propuesta ganadora]. Premios buildingSMART 2020, Categoría Tecnología, buildingSMART International. <https://www.buildingsmart.org/bsi-awards-2020/winners/>
- Logothetis, S., Delinasiou, A., & Stylianidis, E. (2015). Building Information Modelling for Cultural Heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 177-183. <https://doi.org/10.5194/isprsaannals-II-5-W3-177-2015>
- López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>
- Mamani Fuentes, F. (2022). La carpintería de armar en el virreinato del Perú. En *Actas del Duodécimo Congreso Nacional y Cuarto Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción* (Vol. 2, pp. 637-646). Sociedad Española de Historia de la Construcción. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8854357>

- Ministerio de Cultura. (2017). *Identificación y declaratoria del Patrimonio Histórico Inmueble—Épocas colonial, Republicana y Contemporánea*. Ministerio de Cultura. <http://repositorio.cultura.gob.pe/handle/CULTURA/753>
- Ministerio de Educación. (2006). *Decreto Supremo N.º 011-2006-ED: Reglamento de la Ley General del Patrimonio*. <https://www.gob.pe/institucion/minedu/normas-legales/118132-011-2006-ed>
- Negro, S. (2019). Reflexiones sobre el patrimonio cultural del Perú, contextos y perspectivas. *Tradición, segunda época*, 19, Article 19. <https://doi.org/10.31381/tradicion.v0i19.2636>
- Oostwegel, L. J. N., Jaud, Š., Muhič, S., & Malovrh Rebec, K. (2022). Digitalization of culturally significant buildings: Ensuring high-quality data exchanges in the heritage domain using OpenBIM. *Heritage Science*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00640-y>
- Pocabelli, D. P., Boehm, J., Bryan, P., Still, J., & Grau-Bové, J. (2018). Building information models for monitoring and simulation data in heritage buildings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2, 909-916. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-909-2018>
- Ratti, C., & Claudel, M. (2015). *Open source architecture*. Thames & Hudson. <http://www.mylibrary.com?id=760574>
- Rebec, K. M., Deanovič, B., & Oostwegel, L. (2022). Old buildings need new ideas: Holistic integration of conservation-restoration process data using Heritage Building Information Modelling. *Journal of Cultural Heritage*, 55, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jculher.2022.02.005>
- Rocha, G., Mateus, L., Fernández, J., & Ferreira, V. (2020). A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 47-67.
- Sacks, Rafael, Eastman, Charles, Lee, Ghang, & Teicholz, Paul. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (3rd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-sg/BIM+Handbook%3A+A+Guide+to+-Building+Information+Modeling+for+Owners%2C+Designers%2C+Engineers%2C+Contractors%2C+and+Facility+Managers%2C+3rd+Edition-p-9781119287537>
- Sattler, L., Samir, L., Pellerin, R., Paviot, T., Deneux, D., & Maigne, T. (2021). A Survey About BIM Interoperability and Collaboration Between Design and Construction. En T. D, B. T, L. P. Jf, & M. J.r (Eds.), *1st Latin-American Workshop on Service-Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future* (Vol. 987, pp. 151-179). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80906-5_11
- Scandurra, S., & di Lugo, A. (2023). BSDD to document state of preservation of architectural heritage in open-hbim systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, 1427-1434. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1427-2023>
- Silva, F. B. L., & Cuperschmid, A. R. M. (2022). HBIM e mapa de danos: Uma revisão sistemática da literatura. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 13, e022003-e022003. <https://doi.org/10.20396/parc.v13i00.8663653>
- Tchouanguem Djuedja, J. F., Karray, M. H., Foguem, B. K., Magniont, C., & Abanda, F. H. (2019). Interoperability Challenges in Building Information Modelling (BIM). En P. Block, C. Gengnagel, C. H. L. Gengnagel, J. Lienhard, & N. Saragosti (Eds.), *Computer-Aided Architectural Design. Future Trajectories. CAAD Futures 2019* (pp. 275-282). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-03-13693-2_23
- Tolentino, M. M. A. (2016). A utilização do HBIM na documentação, na gestão e na preservação do Patrimônio Arquitetônico. *Blucher Design Proceedings*, 3(1), 510-518. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-534>