



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Implementación de la metodología HBIM-VR para la
documentación y difusión patrimonial: capilla de San
Francisco de Borja de la catedral de València

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Conservación del Patrimonio
Arquitectónico

AUTOR/A: Rosales Montoya, Juan Camilo

Tutor/a: García Valldecabres, Jorge Luis

Cotutor/a: Cortés Meseguer, Luis

Cotutor/a: Escudero, Pablo Ariel

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



MASTER OFICIAL EN
CONSERVACIÓN DEL
PATRIMONIO ARQ.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Implementación de la metodología HBIM-VR para la
documentación y Difusión Patrimonial: Capilla de San
Francisco de Borja de la Catedral de València

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Conservación del Patrimonio
Arquitectónico

Autor: Rosales Montoya, Juan Camilo

Tutor: García Valdecabres, Jorge Luis

Cotutor: Cortés Meseguer, Luis

Cotutor: Escudero, Pablo Ariel

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025



Implementación de la metodología HBIM-VR para la documentación y difusión patrimonial: capilla de San Francisco de Borja de la catedral de València



RESUMEN

En la actualidad las nuevas tecnologías, son las que marcan las tendencias en las diferentes industrias y el sector de la conservación del patrimonio arquitectónico no se queda atrás, son muchas las nuevas industrias e investigaciones que surgen para lograr una mejor gestión, intervención e integración de información relacionada al patrimonio, entre ellas la implementación de la metodología HBIM busca automatizar y agilizar la manipulación de información en un ambiente interdisciplinario donde se logre unificar y establecer métodos de trabajo. Ya que, la ausencia de sistemas digitales integrados en la conservación del patrimonio dificulta el correcto aprovechamiento de todos los datos heterogéneos que hacen parte de este, retrasando también el desarrollo de estrategias de participación integradoras, lo que afecta tanto a los esfuerzos de preservación como a la accesibilidad de los visitantes. Este trabajo busca mostrar las ventajas que tiene utilizar esta metodología aplicándola a un objeto de estudio; la capilla de san Francisco de Borja, obra de los arquitectos Antonio Gilabert y Lorenzo Martínez durante el siglo XVIII. Es de estilo neoclásico y se encuentra ubicada dentro de la catedral de Valencia. Se trata de un elemento patrimonial rico en elementos arquitectónicos, escultóricos, hogar en el que se encuentran las interesantes pinturas al Óleo de Francisco de Goya. El trabajo, también busca, lograr la implementación de tecnologías digitales y de planes de ejecución HBIM, (Historic Building Information Modeling) para llegar más allá del solo documentar, explorando las formas de facilitar el desarrollo de las experiencias inmersivas al patrimonio y la historia permitiendo desarrollar estrategias innovadoras para una mayor accesibilidad al patrimonio a un mayor número de personas de toda condición. La metodología implementada en este estudio se centra en la aplicación de un modelo de actuación HBIM a la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en la Catedral de Valencia. Inicialmente, se realizó un levantamiento de datos mediante escaneo láser 3D de alta definición, obteniendo una nube de puntos detallada de la capilla. Posteriormente, esta información se convirtió en un modelo 3D paramétrico utilizando software especializado, incorporando datos alfanuméricos sobre materiales, historia de la capilla (documentación histórica) y el estado de conservación. Para facilitar el flujo de trabajo, se busca implementar un (BEP) para que este estudio pueda ser replicable en otros elementos históricos logrando conectar los datos del modelo HBIM para una visualización en entornos de realidad virtual y experiencias inmersivas, que fomenten la difusión del patrimonio sin fronteras físicas. Con el objetivo de mejorar la accesibilidad, se diseñaron experiencias de realidad aumentada y virtual que ofrecen visitas inmersivas, complementadas con modelos táctiles impresos en 3D de elementos significativos de la capilla para visitantes con discapacidad visual. Finalmente, se alinearon las acciones con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como la conservación del patrimonio cultural y la promoción de la inclusión y accesibilidad, maximizando el aprovechamiento de la información recopilada y generada mediante la metodología HBIM.

Palabras clave: HBIM; Patrimonio cultural; catedral de valencia; modelado 3D; realidad virtual



Abstract

Currently, new technologies are setting the trends in different industries and the sector of architectural heritage conservation is not left behind, there are many new industries and research that arise to achieve better management, intervention and integration of information related to heritage, among them the implementation of the HBIM methodology seeks to automate and streamline the handling of information in an interdisciplinary environment where it is possible to unify and establish working methods, The absence of integrated digital systems in heritage conservation hinders the proper use of all the heterogeneous data that are part of it, also delaying the development of inclusive participation strategies, which affects both preservation efforts and the accessibility of visitors. This work seeks to show the advantages of using this methodology by applying it to an object of study; the chapel of San Francisco de Borja, work of the architects Antonio Gilabert and Lorenzo Martinez during the eighteenth century in neoclassical style located inside the cathedral of Valencia. A heritage element rich in architectural and sculptural elements and home to oil paintings by Francisco de Goya. The work, thus, also seeks to achieve the implementation of digital technologies and HBIM (Historic Building Information Modeling) execution plans to go beyond just documenting, exploring ways to facilitate the development of immersive experiences to heritage and history allowing to implement innovative strategies for greater accessibility to heritage to everyone. The methodology implemented in this study focuses on the application of an HBIM performance model to the Chapel of San Francisco de Borja, located in the Cathedral of Valencia. Initially, a data survey was performed by high-definition 3D laser scanning, obtaining a detailed point cloud of the chapel. Subsequently, this information was converted into a parametric 3D model using specialized software, incorporating alphanumeric data on materials, history of the chapel (historical documentation) and state of conservation. To facilitate the workflow, we seek to implement a (BEP) so that this study can be replicable in other historical elements, connecting the data of the HBIM model for visualization in virtual reality environments and immersive experiences, which promote the dissemination of heritage without physical boundaries. In order to improve accessibility, augmented and virtual reality experiences were designed to offer immersive visits, complemented with 3D printed tactile models of significant elements of the chapel for visually impaired visitors. Finally, the actions were aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), such as the conservation of cultural heritage and the promotion of inclusion and accessibility, maximizing the use of the information collected and generated through the HBIM methodology.

Keywords: HBIM; Cultural heritage: Valencia cathedral; 3D Modeling; virtual reality.



AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Máster y que han acompañado mi proceso académico y personal a lo largo de este camino.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis tutores y cotutores, el Dr. Jorge Luis García Valdecabres, el Dr. Luis Cortés Meseguer y el Dr. Pablo Ariel Escudero, por su guía por compartir su tiempo, experiencia y visión. A mis padres, quienes han sido mi pilar más firme y constante, les debo todo, su apoyo incondicional y su amor me han permitido llegar hasta aquí, gracias por enseñarme con el ejemplo y por sostenerme incluso en la distancia. También quiero agradecer de corazón a mis amigos, que han sido mi familia lejos de casa.



Listado de abreviaturas y siglas utilizadas en el presente trabajo

Sigla / Significado

AEC: Arquitectura, Ingeniería y Construcción (Architecture, Engineering and Construction)

AR/ RA: Realidad Aumentada (Augmented Reality)

BEP: Plan de Ejecución BIM (BIM Execution Plan)

BIC: Bien de Interés Cultural

BIM: Building Information Modeling

CIM: City Information Modeling

GIS: Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)

HBEP: Heritage BIM Execution Plan (Plan de Ejecución BIM adaptado al Patrimonio)

HBIM: Heritage Building Information Modeling

IFC: Industry Foundation Classes (formato abierto e interoperable para BIM)

IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas)

LOD: Level of Detail (Nivel de Detalle)

LOI: Level of Information (Nivel de Información)

LOK: Level of Knowledge (Nivel de Conocimiento)

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ReCap: Autodesk ReCap (Reality Capture)

Revit: Autodesk Revit (software BIM para modelado paramétrico)

RV: Realidad Virtual

VR: Virtual Reality (Realidad Virtual)



1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 CONTEXTO Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO	9
1.2. ESTADO DEL ARTE EN LA GESTIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO	10
1.2.1. INTRODUCCIÓN A LA DIGITALIZACIÓN DEL PATRIMONIO Y SU ESTADO ACTUAL	10
1.2.2. HBIM: METODOLOGÍA, EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL	11
1.2.3. ACCESIBILIDAD DIGITAL Y EXPERIENCIAS INMERSIVAS	13
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
1.4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	17
1.5 METODOLOGÍA GENERAL DE TRABAJO	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y SU GESTIÓN EN LA ERA DIGITAL	19
2.2. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) Y SU EVOLUCIÓN	21
2.3. HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (HBIM): CONCEPTOS, APLICACIONES Y RETOS	23
2.4. GEMELOS DIGITALES APLICADOS AL PATRIMONIO CULTURAL	25
2.4.1 EJEMPLOS REPRESENTATIVOS: CATEDRAL DE MILÁN Y CIUDAD ANTIGUA DE SUZHOU	27
2.5. ACCESIBILIDAD E INCLUSIÓN EN ENTORNOS PATRIMONIALES	30
2.6. REALIDAD AUMENTADA Y VIRTUAL EN LA DIFUSIÓN DEL PATRIMONIO	31
3. METODOLOGÍA	32
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO Y ESTRUCTURA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.2. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: LA CAPILLA DE SAN FRANCISCO DE BORJA	34
3.3. FASE 1: REVISIÓN DOCUMENTAL E HISTÓRICA	35
3.3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	35
3.3.2. RECOPILACIÓN DE FUENTES PRIMARIAS Y SECUNDARIAS	36
3.4. FASE 2: LEVANTAMIENTO Y DIAGNÓSTICO DEL BIEN PATRIMONIAL	37
3.4.1. TRABAJO DE CAMPO: ESCANEÓ LÁSER 3D Y FOTOGRAMETRÍA	38
3.4.2. EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE DAÑOS	39
3.5. FASE 3: PLAN DE EJECUCIÓN HBIM (BEP) Y DISEÑO DE PROTOCOLOS	40
3.5.1. DEFINICIÓN DEL BEP APLICADO AL ENTORNO PATRIMONIAL	40
3.5.2. MODELADO HBIM Y ORGANIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS	50
3.6. FASE 4: DESARROLLO DEL GEMELO DIGITAL Y EXPERIENCIAS INMERSIVAS	53
3.7. FASE 5: DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE ACCESIBILIDAD E INCLUSIÓN	54
3.7.1. MODELOS TÁCTILES IMPRESOS EN 3D CON DESCRIPCIONES EN BRAILLE	55
3.7.2. MAPAS HÁPTICOS DE LOCALIZACIÓN ESPACIAL	56
3.7.4. USO DE COLORES ACCESIBLES Y CONTRASTE ADAPTADO	56



4. CASO DE ESTUDIO: LA CAPILLA DE SAN FRANCISCO DE BORJA	57
4.1. HISTORIA Y CONTEXTO ARQUITECTÓNICO	58
4.2. CARACTERÍSTICAS ARQUITECTÓNICAS Y ESTRUCTURALES	60
4.3. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN	65
4.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA HBIM AL CASO DE ESTUDIO	69
4.4.1. CREACIÓN DEL ARCHIVO Y PLANTILLA DE TRABAJO	69
4.4.2. INSERCIÓN DE DOCUMENTOS GUÍA EN EL ARCHIVO	70
4.4.3. MODELADO DEL PAVIMENTO	70
4.4.4. MODELADO DE FAMILIAS QUE CONFORMAN EL EDIFICIO CON SU RESPECTIVO LOD Y LOK	71
4.4.5. ASIGNACIÓN DE PARÁMETROS E INFORMACIÓN A LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	73
4.4.6. ENLAZADO DE DOCUMENTOS, CARTOGRAFÍAS HISTÓRICAS EXISTENTES Y DOCUMENTOS DE ARCHIVO	74
4.4.7. INTEGRACIÓN DEL MODELO PARCIAL EN EL CONTEXTO GENERAL DE LA CATEDRAL	74
4.4.8. EXPORTACIÓN A SOFTWARE DE REALIDAD VIRTUAL	76
4.5. RESULTADOS DEL MODELADO Y DOCUMENTACIÓN DIGITAL	76
4.6. DISEÑO Y RESULTADOS DE EXPERIENCIAS RA/RV	77
4.6.1 LINK CON EL MODELO DE REVIT	78
4.6.2 AJUSTE DE COLISIONES Y MATERIALES	78
4.6.3 DISEÑO DE INTERFAZ DE USUARIO MEDIANTE PROGRAMACIÓN	79
4.6.4 ADAPTACIÓN DE STORY TELLING PARA LA EXPERIENCIA AR/VR	79
4.6.5 PRUEBAS Y RESULTADOS	80
4.7. PROTOTIPOS INCLUSIVOS: MODELOS TÁCTILES Y MUSEOGRAFÍA ADAPTADA	82
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	84
5.1. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	85
5.2. BENEFICIOS DEL ENFOQUE HBIM APLICADO A PATRIMONIO	86
5.3. RETOS TÉCNICOS, METODOLÓGICOS Y OPERATIVOS	88
5.4. REFLEXIÓN SOBRE LA ACCESIBILIDAD Y EL IMPACTO SOCIAL	90
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
6.1. RESUMEN DE HALLAZGOS Y APORTES DE LA INVESTIGACIÓN	91
6.2. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	92
6.3. RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	94
7. BIBLIOGRAFÍA	95
7.1. FUENTES WEB	99
8. ANEXOS	100



1. Introducción

1.1 Contexto y relevancia del estudio

La gestión del patrimonio arquitectónico ha evolucionado en las últimas décadas hacia enfoques más integrales, interdisciplinarios y digitalizados, impulsados por la necesidad de preservar la memoria colectiva, fomentar el turismo cultural sostenible y adaptar los bienes patrimoniales a los valores contemporáneos como la inclusión y la accesibilidad. En este contexto, la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en la Catedral de Valencia, se presenta como un ejemplo representativo de patrimonio arquitectónico de gran valor artístico e histórico, cuya conservación y difusión exigen soluciones innovadoras.

Uno de los principales desafíos en la gestión de bienes patrimoniales radica en la complejidad y dispersión de la información asociada. Documentos históricos, datos constructivos, estudios de patologías y materiales, así como planos o intervenciones previas, suelen estar almacenados en formatos heterogéneos y no siempre accesibles de manera unificada (Saggi & Remondino, 2013). Esta fragmentación dificulta la toma de decisiones informadas, la planificación de intervenciones sostenibles y la generación de experiencias patrimoniales enriquecedoras para todo tipo de público.

Ante esta situación, el desarrollo e implementación de herramientas digitales como el Historic Building Information Modeling (HBIM) y los gemelos digitales permite integrar, visualizar y gestionar eficazmente dicha información en modelos tridimensionales parametrizados. Según Yang et al. (2020), “la integración de HBIM con otras tecnologías de información constituye un paso clave hacia una gestión eficiente del patrimonio construido”, mientras que Bassier et al. (2016) destacan el potencial de estas herramientas para centralizar datos diversos y mejorar la interoperabilidad entre agentes.

Dentro de estas dinámicas emergentes, el concepto de gemelo digital —como representación virtual viva de un objeto físico real— permite simular, monitorear e intervenir de forma estratégica sobre los bienes patrimoniales, convirtiéndose en una plataforma para la toma de decisiones informadas, la accesibilidad digital y la difusión cultural (Bertacchi, 2022).

Este trabajo, por tanto, propone aplicar un enfoque metodológico basado en HBIM a través del desarrollo de un Plan de Ejecución BIM (HBEP) específicamente adaptado al caso de la Capilla de San Francisco de Borja. Este plan busca organizar los flujos de trabajo, centralizar la información, facilitar su documentación digital e incorporar estrategias de accesibilidad mediante experiencias inmersivas y tecnologías inclusivas.



Asimismo, se alinea con las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11.4, que promueve la protección del patrimonio cultural, y el ODS 10, orientado a reducir desigualdades y promover el acceso inclusivo a la cultura y la historia.

En este sentido, la relevancia del presente estudio radica en:

- Aplicar tecnologías digitales innovadoras en la gestión, conservación y divulgación del patrimonio arquitectónico en el contexto de Valencia.
- Proponer un protocolo metodológico replicable a través del desarrollo de un HBEP.
- Facilitar el acceso universal a la experiencia patrimonial mediante entornos inmersivos y elementos inclusivos como modelos táctiles.
- Contribuir a la integración del patrimonio cultural con los principios de sostenibilidad, accesibilidad e inclusión, promoviendo una gestión más equitativa y eficiente.

1.2. estado del arte en la gestión del patrimonio histórico

1.2.1. Introducción a la digitalización del patrimonio y su estado actual

En las últimas décadas, el campo de la conservación patrimonial ha experimentado una transformación significativa gracias a la incorporación de tecnologías digitales avanzadas. Esta evolución ha dado paso a lo que actualmente se conoce como gestión patrimonial digital, entendida como el uso de herramientas y metodologías orientadas a documentar, analizar, conservar y difundir el patrimonio cultural mediante entornos virtuales dinámicos, colaborativos y accesibles.

La digitalización del patrimonio se apoya fundamentalmente en tecnologías como el escaneo láser 3D, la fotogrametría digital, el modelado tridimensional basado en datos reales (Scan-to-BIM) y, más recientemente, el Heritage Building Information Modeling (HBIM). Estas herramientas han permitido avanzar desde una documentación puramente gráfica hacia la creación de modelos digitales inteligentes, capaces de integrar información geométrica, material, histórica y de conservación en un único entorno (Escudero, 2021).

Según Bertacchi (2022), la gestión digital del patrimonio comprende no solo la generación de modelos tridimensionales precisos, sino también su capacidad para integrar datos heterogéneos procedentes de múltiples fuentes —planos históricos, informes técnicos, inventarios materiales, diagnósticos estructurales— con el fin de crear sistemas de información eficientes y adaptables. Este enfoque permite optimizar los procesos de intervención, generar estrategias de mantenimiento preventivo y, además, ofrecer nuevas posibilidades de difusión y acceso público.



En este sentido, la gestión digital del patrimonio no debe entenderse únicamente como una herramienta técnica para documentar el pasado, sino como un sistema estratégico que articula información compleja y dispersa con fines operativos, preventivos y comunicativos. La capacidad de reunir datos multidisciplinares en un entorno digital integrado amplía sustancialmente las posibilidades de actuación sobre el patrimonio, no solo en términos de conservación, sino también en la forma en que este se interpreta, se comunica y se hace accesible a distintos públicos. Esta evolución metodológica sienta las bases para el desarrollo de entornos digitales más avanzados, como los gemelos digitales patrimoniales, que permiten representar y gestionar el bien cultural como un sistema dinámico, interactivo y conectado en tiempo real.

En este contexto, el concepto de gemelo digital (Digital Twin) ha comenzado a adquirir relevancia en la gestión de bienes culturales. Originalmente utilizado en la industria para simular el comportamiento de activos físicos en tiempo real, su aplicación al patrimonio permite representar virtualmente un edificio o estructura patrimonial, vinculado con datos actualizables que reflejan su evolución, estado estructural o condiciones ambientales. Tal como señala Bertacchi, los modelos 3D pueden convertirse en bases de datos activas que, además de documentar el bien, permiten planificar intervenciones, simular escenarios y facilitar la toma de decisiones fundamentadas (Bertacchi, 2022).

Sin embargo, a pesar del potencial demostrado por estas tecnologías, su implementación generalizada aún enfrenta importantes desafíos. Entre ellos destacan la falta de estandarización en los procesos, la complejidad geométrica de muchos bienes históricos, los altos costes asociados a la adquisición de datos y software especializado, y la necesidad de formación técnica específica para su uso eficiente (Escudero, 2021). Asimismo, la integración de estas herramientas con estrategias de accesibilidad o inclusión social todavía se encuentra en una fase inicial en muchos contextos institucionales.

En definitiva, la digitalización del patrimonio ya no puede considerarse una tendencia emergente, sino una necesidad operativa dentro de una gestión patrimonial contemporánea, sostenible y participativa. El desarrollo de metodologías como HBIM y los gemelos digitales no solo responde a requerimientos técnicos, sino que abre nuevas oportunidades para democratizar el conocimiento patrimonial, fortalecer la memoria colectiva y facilitar el acceso inclusivo a los bienes culturales.

1.2.2. HBIM: Metodología, evolución y estado actual

El Heritage Building Information Modeling (HBIM) ha surgido en la última década como una de las metodologías más innovadoras y potentes para la documentación, gestión y conservación de edificaciones patrimoniales. Derivado de la lógica del BIM aplicado a obra nueva, el HBIM extiende su alcance hacia entornos históricos mediante la integración de información geométrica, histórica, constructiva y material en modelos paramétricos tridimensionales enriquecidos semánticamente.



Según Dore y Murphy (2017), el HBIM representa un enfoque que va más allá de la simple modelación tridimensional, constituyéndose en una base de datos inteligente construida a partir de nubes de puntos y datos fotogramétricos, que permite documentar no solo la forma, sino también el significado y las transformaciones históricas de los edificios.

Uno de los principales retos del HBIM ha sido la falta de herramientas y bibliotecas específicas en el software BIM convencional, que tradicionalmente ha estado orientado a obra nueva. Como resultado, el modelado de elementos arquitectónicos históricos requiere con frecuencia el desarrollo de familias paramétricas personalizadas Dore y Murphy (2017), lo que implica una inversión significativa en tiempo y conocimiento experto. Este proceso no solo exige habilidades avanzadas en diseño paramétrico, sino también un profundo conocimiento de las técnicas constructivas históricas y de los lenguajes formales del patrimonio edificado. La ausencia de objetos predefinidos obliga a una reconstrucción casi artesanal de cada componente, ralentizando considerablemente los flujos de trabajo y limitando la escalabilidad de los proyectos. En muchos casos, este obstáculo puede condicionar la viabilidad operativa del modelado HBIM, especialmente cuando los equipos no cuentan con especialistas en patrimonio o recursos técnicos suficientes. Esta situación subraya la necesidad urgente de desarrollar bibliotecas paramétricas específicas para patrimonio, que permitan sistematizar y agilizar el modelado sin sacrificar la precisión ni el valor interpretativo del bien.

En cuanto a la captura de datos, el HBIM se apoya principalmente en técnicas como el escaneo láser 3D (TLS) y la fotogrametría de rango cercano, cuyas combinaciones permiten generar modelos tridimensionales de alta precisión. No obstante, el proceso de conversión de datos no estructurados (nubes de puntos) en modelos semánticos estructurados sigue siendo altamente manual y laborioso, aunque se están desarrollando avances hacia la automatización parcial de tareas como la reconstrucción geométrica y el reconocimiento de objetos (Xiong et al., 2013)

En este contexto, diversos estudios han explorado el concepto de HBIM no solo como herramienta de documentación geométrica, sino como una plataforma integral para la gestión del patrimonio edificado. Su capacidad para centralizar información procedente de fuentes heterogéneas (como escaneos láser, planos históricos, informes de patologías y bases de datos técnicas) lo convierte en una herramienta idónea para la planificación estratégica de intervenciones. En el ámbito de la conservación preventiva, el modelo HBIM permite identificar zonas de riesgo, simular escenarios de deterioro o intervención, y programar acciones de mantenimiento basadas en evidencia, optimizando así recursos y minimizando intervenciones invasivas.

Más allá de su función técnica, el HBIM se presenta también como un vehículo para la accesibilidad universal y la difusión cultural. Al servir de base para la visualización inmersiva



en entornos de realidad virtual o aumentada, abre nuevas posibilidades para acercar el patrimonio a públicos diversos, incluyendo personas con discapacidad o dificultades de acceso físico al bien. Escudero (2021), por ejemplo, demuestra la eficacia del HBIM para consolidar información dispersa y convertirla en una base de gestión más sostenible, transparente y colaborativa, integrando aspectos educativos, inclusivos y participativos en los procesos de valorización patrimonial. Estas capacidades posicionan al HBIM como una herramienta versátil, capaz de adaptarse tanto a necesidades técnicas como sociales dentro del ecosistema patrimonial.

Asimismo, para que el modelo HBIM pueda cumplir eficazmente con sus múltiples funciones (desde la documentación y el análisis hasta la visualización inmersiva y la conservación preventiva), es imprescindible contar con bibliotecas de objetos paramétricos que reflejen con fidelidad los elementos arquitectónicos del patrimonio histórico. Esta necesidad ha motivado una línea de investigación activa centrada en el desarrollo de familias paramétricas adaptadas a estructuras y detalles no estandarizados. En este ámbito, destacan los aportes de (Fai y Rafeiro 2014), quienes han propuesto niveles de desarrollo (LoD) específicos y adecuados para la documentación patrimonial, reconociendo que la complejidad formal y simbólica de muchos bienes exige ajustes distintos a los aplicados en edificación contemporánea. De forma complementaria, (Dore y Murphy 2017) han abogado por incorporar al entorno BIM elementos procedentes del diseño clásico, extraídos de tratados históricos y manuscritos, como una forma de enriquecer semánticamente el modelado y dotar de mayor coherencia histórica a la representación digital. Estas iniciativas permiten mejorar la calidad del modelo HBIM, no solo en términos geométricos, sino también como instrumento de transmisión del conocimiento arquitectónico, facilitando una lectura integral del bien patrimonial tanto para especialistas como para públicos diversos.

Aunque la integración del HBIM con tecnologías como los gemelos digitales, la realidad aumentada o la simulación estructural aún está en evolución, su implementación progresiva ha demostrado ser clave para avanzar hacia una gestión patrimonial más proactiva, inclusiva y basada en datos.

1.2.3. Accesibilidad Digital y Experiencias Inmersivas

En el contexto actual de digitalización del patrimonio, las tecnologías inmersivas como la realidad virtual (VR), la realidad aumentada (AR) y los modelos táctiles 3D se consolidan como herramientas clave para mejorar la accesibilidad, la inclusión y la experiencia del usuario. Estas tecnologías no solo permiten representar entornos patrimoniales de forma fidedigna, sino también ampliar su alcance a públicos diversos, superando barreras físicas, sensoriales y geográficas.

La realidad virtual se ha implementado con éxito en numerosos proyectos de conservación patrimonial por su capacidad de generar experiencias inmersivas de alta fidelidad. En China, por ejemplo, su uso ha permitido recrear con gran detalle sitios patrimoniales como

la Ciudad Prohibida (GhostBull, s. f.) Figura 1 o las Cuevas de Mogao, facilitando tanto su conservación digital como el acceso remoto a través de museos virtuales y recorridos interactivos. Esto no solo fomenta el aprendizaje significativo, sino también un mayor compromiso emocional con el patrimonio cultural (Chen, 2024).



Figura 1. Vista inmersiva de la Puerta Suprema de la Armonía en la Ciudad Prohibida de Pekín, capturada en una experiencia 360° de la plataforma Theasys.

Desde un enfoque teórico, se ha demostrado que tecnologías como VR y AR favorecen la construcción de conocimiento mediante experiencias significativas, tal como lo propone la teoría del aprendizaje constructivista. A ello se suma la teoría de la presencia, que sostiene que estas tecnologías permiten una sensación inmersiva de “estar allí”, lo que resulta especialmente valioso en contextos patrimoniales inaccesibles o frágiles (Liu, Zhang, & Wang, 2020).

Además, la integración de modelos HBIM en entornos inmersivos permite una consulta estructurada y jerárquica de información histórica, constructiva y de conservación del bien patrimonial. El estudio de (Sanfilippo, Tataru, Hua, Johansson & Andone, 2023) demuestra que los flujos de trabajo que combinan HBIM y realidad virtual no solo optimizan el acceso a datos técnicos complejos, sino que también permiten desarrollar experiencias educativas y museográficas interactivas que favorecen la accesibilidad universal.

Otra herramienta destacada son los modelos táctiles 3D, que permiten la exploración sensorial del patrimonio por parte de personas con discapacidad visual. Este enfoque ha sido respaldado por investigaciones recientes que subrayan su potencial como recurso didáctico e inclusivo, reforzando la idea de que la tecnología puede facilitar el acceso equitativo al conocimiento del patrimonio cultural.



Por último, proyectos como los desarrollados en la ciudad de Suzhou, China, evidencian cómo la digitalización avanzada puede dar lugar a metauniversos patrimoniales, espacios virtuales inmersivos donde el visitante interactúa con réplicas digitales de edificios históricos, ampliando su margen de acción al integrar experiencias de gamificación y narrativa digital (Yang et al., 2024).

En este marco, la aplicación de estas tecnologías al estudio de la Capilla de San Francisco de Borja tiene el potencial de democratizar el acceso al patrimonio, fortalecer el vínculo emocional con los espacios históricos y promover estrategias inclusivas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11, enfocado en ciudades sostenibles y accesibles.

1.3. Justificación del trabajo

La presente investigación se justifica por la necesidad urgente de modernizar las estrategias de conservación y gestión del patrimonio arquitectónico, integrando metodologías digitales que permitan un uso más eficiente, inclusivo y sostenible de los recursos disponibles. En este contexto, la Capilla de San Francisco de Borja, situada en la Catedral de Valencia, representa un caso de estudio idóneo tanto por su valor arquitectónico y artístico, como por los desafíos que plantea su conservación y difusión accesible en el contexto urbano actual.

Uno de los principales motivos que justifica este trabajo es la creciente necesidad de consolidar metodologías que integren documentación precisa, gestión de datos patrimoniales, estrategias de accesibilidad y visualización avanzada, en entornos que tradicionalmente han sido tratados desde perspectivas fragmentadas. Como señalan Bertacchi (2022) y Escudero (2021), la falta de interoperabilidad entre plataformas, la heterogeneidad de las fuentes documentales y la dificultad de acceso a la información histórica, siguen siendo barreras significativas en la gestión patrimonial.

En respuesta a estos retos, este estudio plantea la aplicación de la metodología Heritage Building Information Modeling (HBIM) como eje estructurador del proceso de documentación y gestión de la Capilla de San Francisco de Borja. El modelo HBIM no solo permite centralizar información geométrica, constructiva e histórica, sino que actúa como base para el desarrollo de un gemelo digital que facilite la visualización, simulación y difusión del patrimonio. Este enfoque se articula mediante la elaboración de un Plan de Ejecución HBIM (HBEP) adaptado al contexto patrimonial, garantizando la trazabilidad del proceso y su potencial replicabilidad.

Otra dimensión clave que justifica este trabajo es su compromiso con la accesibilidad universal y la inclusión social en el ámbito cultural. El desarrollo de experiencias inmersivas en realidad virtual y aumentada, junto con la generación de modelos táctiles impresos en 3D



para personas con discapacidad visual, permite ampliar el alcance del patrimonio hacia públicos tradicionalmente excluidos de la experiencia museográfica convencional. Esta línea de actuación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 10 (Reducción de desigualdades) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), que promueven el acceso equitativo al patrimonio cultural como derecho colectivo.

Además, esta investigación responde a la necesidad de generar modelos metodológicos replicables para otros bienes patrimoniales con características similares. La falta de protocolos específicos para el uso del HBIM en entornos patrimoniales —especialmente en el contexto español— evidencia una laguna metodológica que este trabajo pretende abordar. Como destaca Escudero (2021), es esencial adaptar los marcos digitales de gestión a las particularidades materiales, constructivas y simbólicas del patrimonio histórico.

Por último, la relevancia local del estudio aporta un valor añadido. Valencia es una ciudad con un importante acervo patrimonial que requiere enfoques innovadores para su preservación. La aplicación de este tipo de tecnologías en bienes concretos como la Capilla de San Francisco de Borja contribuye no solo a su conservación, sino también a su resignificación como espacio inclusivo, didáctico y participativo.

En suma, este trabajo se considera justificado por:

- La necesidad de gestión integrada de la información patrimonial en entornos históricos complejos.
- La oportunidad de proponer un protocolo HBIM (HBEP) aplicado al patrimonio arquitectónico.
- El interés en explorar tecnologías inclusivas e inmersivas para la divulgación del patrimonio.
- La alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en materia de cultura, accesibilidad e innovación.
- La contribución al desarrollo de casos de estudio locales que enriquezcan la investigación patrimonial aplicada en España.



1.4. Objetivos generales y específicos

Objetivo General

- **Establecer** un modelo de gestión inteligente del patrimonio arquitectónico mediante la aplicación de un BEP para un gemelo digital HBIM, con el fin de generar experiencias inmersivas en realidad virtual, integrar datos heterogéneos del caso de estudio de la Capilla de San Francisco de Borja, y mejorar la accesibilidad inclusiva. Se busca, a través de este caso práctico, proponer un protocolo metodológico replicable para la conservación y gestión sostenible e innovadora de otros bienes patrimoniales.

Objetivos Específicos:

1. Gestión y Documentación Patrimonial:

- **Implementar** la metodología HBIM en la Capilla de San Francisco de Borja para **generar** un modelo digital estructurado que integre información geométrica, histórica y constructiva.
- **Integrar** bases de datos heterogéneas (materiales, técnicas, patologías) dentro del modelo HBIM, asegurando su coherencia y trazabilidad.

2. Desarrollo de un BEP para Modelado y Documentación:

- **Diseñar** un Plan de Ejecución BIM (BEP) adaptado a entornos patrimoniales, que guíe la implementación del modelado HBIM y permita su replicabilidad.
- **Proponer** un protocolo de trabajo basado en HBIM y gemelos digitales para su aplicación en la conservación y gestión del patrimonio arquitectónico.

3. Accesibilidad e Inclusión en la Experiencia Patrimonial:

- **Desarrollar** experiencias inmersivas de realidad aumentada y virtual fundamentadas en el modelo HBIM para **optimizar** la interacción del público con el patrimonio.
- **Producir** modelos táctiles en 3D de elementos arquitectónicos y artísticos relevantes de la capilla para **facilitar** el acceso y la comprensión a personas con discapacidad visual.
- **Promover** la accesibilidad digital mediante la difusión del modelo HBIM y experiencias inmersivas accesibles a través de plataformas abiertas o museografía interactiva.

4. Evaluación y Aplicabilidad del Modelo



- Evaluar la aplicabilidad del protocolo desarrollado en otros entornos patrimoniales, considerando su escalabilidad, flexibilidad y replicabilidad.
- Alinear el estudio con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en los ámbitos de conservación del patrimonio cultural, inclusión social e innovación tecnológica.

1.5 Metodología General de Trabajo

La metodología adoptada en este Trabajo de Fin de Máster se basa en un enfoque interdisciplinario y digital, integrando herramientas avanzadas como el escaneo láser 3D, la fotogrametría y la metodología HBIM (Historic Building Information Modeling). El objetivo es desarrollar un modelo de gestión patrimonial inteligente, accesible y replicable, aplicándolo a la Capilla de San Francisco de Borja.

La metodología se articula en cinco fases secuenciales, desde la investigación documental hasta la generación de experiencias inmersivas y modelos inclusivos.

Fase 1: Revisión y Análisis Documental

- Estudio del contexto patrimonial:

Revisión de fuentes primarias y secundarias sobre la Catedral de Valencia y la Capilla de San Francisco de Borja. Se incluye el análisis de planos históricos, tratados arquitectónicos y estudios previos relevantes (como la tesis doctoral de Luis Cortés).

- Análisis de metodologías digitales aplicadas al patrimonio:

Revisión comparativa de estudios y casos de aplicación de HBIM, gemelos digitales y entornos inmersivos (RA/RV) en la documentación y gestión del patrimonio arquitectónico.

Fase 2: Recopilación de Datos y Trabajo de Campo

- Levantamiento digital:

Escaneo láser 3D de alta definición para la obtención de una nube de puntos precisa de la capilla. Complementación con fotogrametría de alta resolución para detalles ornamentales y artísticos.

- Inspección in situ:

Evaluación del estado de conservación mediante observación directa, análisis de patologías y toma de datos ambientales (temperatura, humedad relativa).

Fase 3: Plan de Ejecución HBIM (BEP) orientado a la accesibilidad digital



- Diseño del BEP patrimonial:

Elaboración de un Plan de Ejecución BIM adaptado a entornos históricos (HBEP), con lineamientos específicos para modelado, gestión de datos e implementación de experiencias digitales.

- Estrategia de modelado:

Definición de niveles de detalle (LOD) y de información (LOI), criterios de clasificación y estructura de datos, asegurando trazabilidad, interoperabilidad y replicabilidad.

Fase 4: Modelado HBIM y Gestión de Datos

- Generación del modelo HBIM:

Construcción de un modelo tridimensional paramétrico a partir de la nube de puntos, integrando información histórica, material, constructiva y de conservación.

- Vinculación documental:

Incorporación al modelo de planos antiguos, documentos históricos, fichas descriptivas y análisis técnicos, centralizando toda la información en una única base de datos digital estructurada.

Fase 5: Diseño de Estrategias de Accesibilidad e Inclusión

- Experiencias inmersivas:

Creación de recorridos virtuales y aumentados (RA/RV) basados en el modelo HBIM, orientados a la difusión del patrimonio y a mejorar la experiencia del visitante.

- Accesibilidad inclusiva:

Desarrollo de modelos táctiles impresos en 3D de elementos clave para personas con discapacidad visual. Diseño de entornos digitales accesibles con enfoque universal.

2. Marco teórico

2.1. Patrimonio arquitectónico y su gestión en la era digital

El patrimonio arquitectónico constituye un testimonio tangible de la evolución de las sociedades humanas, reflejando no solo sus valores estéticos y constructivos, sino también su memoria histórica, espiritual y simbólica. A través de su permanencia física, estos bienes ofrecen claves esenciales para comprender los modos de vida, tecnologías, expresiones culturales y sistemas de organización que han caracterizado a distintas civilizaciones a lo largo del tiempo (Vecco, 2010).

Desde una perspectiva institucional, la UNESCO distingue entre patrimonio cultural, natural y subacuático. Dentro del patrimonio cultural, se diferencian los bienes materiales (monumentos, sitios arqueológicos, edificaciones históricas) de los inmateriales (tradiciones, lenguas, expresiones orales), ambos reconocidos como portadores de un valor universal excepcional y, por tanto, sujetos a protección y conservación para las generaciones futuras. Dentro de esta clasificación, el patrimonio arquitectónico material ocupa un lugar central no solo por su visibilidad e impacto en el paisaje urbano, sino también por su capacidad para condensar múltiples capas de significado histórico, artístico y social.

En efecto, este tipo de patrimonio presenta una serie de características complejas que lo distinguen de otros bienes culturales: su tridimensionalidad, su carga simbólica y urbana, su interacción con el entorno, su estado de conservación y la diversidad de materiales y técnicas constructivas involucradas. Estas singularidades convierten su gestión en un desafío multidimensional, en el que convergen disciplinas como la arquitectura, la historia del arte, la ingeniería, la arqueología y, en los últimos años, las ciencias digitales.

Uno de los principales obstáculos en la gestión del patrimonio arquitectónico es la escasa disponibilidad de documentación técnica fiable y actualizada. En muchos casos, los edificios históricos carecen de planos precisos, fichas constructivas completas o registros sistemáticos de intervenciones pasadas. Esta fragmentación de la información limita la capacidad de los equipos técnicos para planificar restauraciones, realizar diagnósticos precisos o proyectar acciones de mantenimiento a largo plazo (Johansson, Roupé & Bosch-Sijtsema, 2015).

A ello se suman los procesos de deterioro y degradación natural que afectan constantemente a los bienes construidos. Factores como la humedad, la contaminación, la radiación solar, las variaciones térmicas o incluso el uso inadecuado y el abandono, actúan de forma acumulativa sobre los materiales, debilitando estructuras, provocando fisuras, alteraciones cromáticas o pérdida de volumen. Tal como indican Mol et al. (2020), el conocimiento estructural de un edificio patrimonial no puede inferirse exclusivamente por su apariencia; requiere de un enfoque sistemático que combine inspección visual, cartografía de daños, análisis geométrico y, en muchos casos, técnicas avanzadas como pruebas no destructivas o modelado estructural.

Además, a diferencia de las construcciones contemporáneas, los edificios históricos no responden a criterios estandarizados: sus elementos estructurales suelen presentar geometrías irregulares, materiales no homogéneos, técnicas constructivas en desuso y reparaciones acumuladas que modifican el comportamiento original de la estructura. Este carácter singular convierte a cada edificio patrimonial en un caso único, lo que exige soluciones adaptadas y, sobre todo, información precisa y centralizada para garantizar una gestión eficiente.

En este contexto, la transformación digital del sector patrimonial no debe entenderse como una mera adopción de nuevas herramientas, sino como un cambio paradigmático en la forma de entender, documentar y gestionar el patrimonio construido. La era digital ha traído consigo la posibilidad de crear representaciones virtuales precisas, multidimensionales e interactivas, capaces de integrar no solo geometría y materiales, sino también historias, procesos, transformaciones y valores simbólicos.

Esta evolución hacia una gestión patrimonial digital busca superar la visión fragmentada del pasado, facilitando el acceso a la información, optimizando los recursos técnicos, promoviendo la conservación preventiva y, sobre todo, ampliando las posibilidades de comunicación, difusión y participación social en los procesos de preservación cultural.

En definitiva, el patrimonio arquitectónico en la era digital se enfrenta al reto de integrar memoria e innovación, respetando su autenticidad material y simbólica, pero utilizando los medios contemporáneos para asegurar su transmisión, comprensión y disfrute en el presente y hacia el futuro.

2.2. Building Information Modeling (BIM) y su evolución

El Building Information Modeling (BIM) se ha consolidado como una metodología transformadora dentro del sector de la arquitectura, la ingeniería y la construcción (AEC), al introducir un paradigma de trabajo colaborativo y digitalmente integrado. Su aparición representa una evolución respecto a los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD), extendiendo las capacidades del modelado tridimensional hacia un entorno de gestión de datos complejos e interrelacionados a lo largo del ciclo de vida de una edificación.

La definición más ampliamente aceptada de BIM proviene del National BIM Standard Project Committee, que lo describe como “una representación digital de las características físicas y funcionales de un objeto construido, que actúa como una fuente de conocimiento compartido para tomar decisiones durante todo su ciclo de vida, desde la concepción hasta la demolición”. Esta visión integral ha sido reforzada por entidades como la BuildingSMART Spanish Chapter, que define BIM como una metodología colaborativa capaz de centralizar la información del proyecto en un modelo digital, incorporando no solo la geometría tridimensional (3D), sino también variables temporales (4D), económicas (5D), ambientales (6D) y de mantenimiento (7D).



Figura 2. Dimensiones HBIM Fuente: Castellano Román & Pinto Puerto (2019)



Orígenes y evolución del concepto BIM

El desarrollo conceptual de BIM tiene sus raíces en los años 70, aunque su aplicación práctica ha comenzado a consolidarse en las últimas dos décadas. Nace como respuesta a la necesidad de gestionar de forma más eficiente los procesos constructivos, permitiendo no solo diseñar, sino también simular, coordinar, analizar y documentar cada fase del proyecto en un entorno digital unificado.

Desde sus orígenes vinculados a las herramientas CAD del MIT (Massachusetts Institute of Technology) en 1955, BIM ha evolucionado hasta convertirse en un entorno multidimensional. Esta evolución ha estado acompañada por una serie de desarrollos paralelos como la estandarización de datos a través de formatos abiertos (como IFC), la aparición de plataformas interoperables (OpenBIM) y el creciente enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia energética.

Principios fundamentales del BIM

BIM no debe ser entendido simplemente como una herramienta de modelado tridimensional, sino como una metodología que transforma el flujo de trabajo y la toma de decisiones en todas las fases del ciclo de vida de un edificio. Entre sus fundamentos destacan:

- **Modelo paramétrico:** Constituye la base del sistema BIM, en el cual todos los elementos poseen relaciones lógicas e interdependencias. Esto permite que cualquier modificación en un parámetro repercuta automáticamente en todas las vistas del modelo, asegurando la coherencia y consistencia de la información.
- **Interoperabilidad y estándares abiertos:** BIM promueve el uso de formatos universales (como IFC) que faciliten el intercambio de información entre distintos actores del proyecto, independientemente del software empleado.
- **Gestión de información multidimensional:** A través de sus diferentes dimensiones (3D a 7D), BIM permite integrar la gestión del tiempo, costes, eficiencia energética y mantenimiento en una sola plataforma digital.

Aplicaciones del BIM en el sector de la construcción

La versatilidad de BIM ha permitido su implementación en diversas áreas del sector constructivo:



- Diseño arquitectónico y coordinación técnica: BIM facilita la creación de modelos digitales coordinados, permitiendo detectar colisiones y errores antes de la ejecución.
- Gestión de obra y planificación 4D/5D: Las herramientas BIM permiten planificar de forma más eficiente los cronogramas de obra y estimar costes de manera más precisa.
- Simulación energética y análisis estructural: A través de software complementario, se pueden realizar simulaciones para evaluar el comportamiento térmico y estructural de un edificio.
- Mantenimiento y operación: El modelo BIM se convierte en un gemelo digital que puede ser utilizado en la etapa de operación para planificar mantenimientos, gestionar instalaciones y registrar intervenciones.

En conjunto, los principios fundamentales y las múltiples aplicaciones del BIM lo posicionan como una herramienta estratégica para la transformación digital del entorno construido. Su capacidad para centralizar información, anticipar problemas, optimizar recursos y facilitar la colaboración interdisciplinar ha permitido mejorar significativamente la eficiencia y la sostenibilidad en los procesos de diseño, construcción y gestión de edificaciones. Este potencial adquiere aún mayor relevancia cuando se considera su adaptación al ámbito del patrimonio arquitectónico, donde la integración de datos históricos, estructurales y de conservación requiere un enfoque riguroso y flexible. En este sentido, BIM no solo representa un avance tecnológico, sino un cambio profundo en la forma de concebir y gestionar los activos construidos a lo largo de su ciclo de vida.

Hacia la expansión conceptual: del BIM al HBIM

Aunque el enfoque original del BIM estaba dirigido principalmente a edificaciones de nueva planta, su potencial ha motivado su adaptación a otros contextos más complejos, como el del patrimonio arquitectónico. Esta evolución ha dado lugar al desarrollo del Historic Building Information Modeling (HBIM), una metodología específica orientada a la conservación y gestión de bienes patrimoniales, que se abordará en el siguiente apartado. El paso del BIM al HBIM supone una transición de la estandarización geométrica hacia la comprensión del edificio como un ente histórico, con particularidades formales, materiales y simbólicas únicas.

2.3. Heritage Building Information Modeling (HBIM): Conceptos, Aplicaciones y Retos

El Heritage Building Information Modeling (HBIM) constituye una evolución del BIM tradicional orientada a la documentación, gestión y conservación del patrimonio arquitectónico. Esta metodología integra la precisión geométrica propia del modelado digital con un



enfoque semántico y multidisciplinar que permite centralizar información histórica, constructiva, material, estructural y de conservación en un entorno digital único. Desde su concepción, el HBIM se ha consolidado como una herramienta clave en los procesos de gestión sostenible del patrimonio construido, especialmente en contextos donde la preservación, el mantenimiento y la accesibilidad resultan prioritarios.

Origen y definición del HBIM

El término HBIM fue introducido por (Murphy, McGovern y Pavia en 2009), como respuesta a la necesidad de adaptar el entorno BIM al contexto específico del patrimonio histórico. A diferencia del BIM convencional, que trabaja con geometrías regulares y elementos estandarizados, el HBIM requiere modelar elementos con geometrías irregulares, desgaste, intervenciones previas y singularidades constructivas propias del tiempo y del uso.

Según Yang et al. (2020), el HBIM es "un sistema basado en modelos paramétricos capaces de representar objetos arquitectónicos históricos complejos, con la posibilidad de integrar datos provenientes de múltiples disciplinas para su análisis y conservación a largo plazo".

Componentes fundamentales del HBIM

- **Precisión geométrica adaptativa:** Utiliza tecnologías como el escaneo láser 3D o la fotogrametría para capturar la geometría real de edificios históricos. A diferencia de los modelos BIM convencionales, el HBIM debe representar imperfecciones, deformaciones y estructuras no repetitivas, respetando la autenticidad geométrica del bien patrimonial (Bertacchi, 2022; Escudero, 2021).
- **Base de datos semántica:** El HBIM vincula información alfanumérica relevante a los componentes del modelo (materiales, fechas de construcción, intervenciones, daños, restauraciones), generando un entorno de conocimiento que facilita la toma de decisiones para conservación o difusión.
- **Objetos paramétricos históricos:** Se desarrollan familias de objetos personalizadas que replican elementos arquitectónicos tradicionales (capiteles, bóvedas, cornisas, nervaduras), frecuentemente ausentes en bibliotecas BIM estándar.
- **Interoperabilidad y trabajo colaborativo:** El HBIM funciona como plataforma integradora entre arquitectos, ingenieros, restauradores, historiadores y expertos en patrimonio, facilitando la cooperación interdisciplinar y el intercambio de información actualizada.
- **Visualización y simulación:** Permite realizar análisis estructurales, térmicos, de accesibilidad y simulaciones de deterioro, facilitando una conservación proactiva basada en datos.



Aplicaciones del HBIM en el patrimonio arquitectónico

El HBIM ha sido aplicado exitosamente en proyectos como la Catedral de Milán, el Teatro Romano de Cartagena o la Ópera de Sídney, donde ha servido como base para la digitalización, el mantenimiento predictivo y la planificación de intervenciones sostenibles.

En el contexto de este TFM, el HBIM será empleado para modelar la Capilla de San Francisco de Borja, incorporando datos heterogéneos sobre materiales, técnicas constructivas y patologías, con el objetivo de crear un gemelo digital interoperable que facilite tanto la gestión como la experiencia patrimonial inmersiva.

Desafíos actuales del HBIM:

- Ausencia de estándares universalmente aceptados: No existe un protocolo común para la estructura de datos HBIM, lo que dificulta su interoperabilidad entre plataformas o equipos.
- Complejidad del modelado: La necesidad de representar elementos únicos obliga al desarrollo de objetos paramétricos personalizados, lo cual demanda tiempo, experiencia y recursos especializados.
- Volumen de datos: Los modelos HBIM pueden llegar a ser pesados y de difícil manejo si no se optimizan adecuadamente.
- Integración con sensores y datos en tiempo real (IoT): Aunque es posible, aún se requiere investigación metodológica para garantizar una integración fluida que no afecte la integridad del modelo.

Proyecciones y potencial de investigación

En los últimos años, el HBIM ha sido vinculado al desarrollo de Gemelos Digitales (Digital Twins), sistemas virtuales capaces de recibir información en tiempo real mediante sensores IoT y de integrar inteligencia artificial para predecir deterioros estructurales. Estos desarrollos abren la puerta a una gestión patrimonial más proactiva, automatizada y accesible, con aplicaciones potenciales en la realidad aumentada, los modelos táctiles 3D y la difusión en entornos museográficos interactivos.

Además, la evolución del HBIM está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 11 sobre ciudades sostenibles e inclusivas, al promover la conservación digital del patrimonio y su accesibilidad universal.

2.4. Gemelos digitales aplicados al patrimonio cultural

La noción de gemelo digital (Digital Twin) ha emergido como una de las innovaciones más significativas en la transformación digital del entorno construido. Su origen se remonta a los

desarrollos de la NASA en el programa Apolo, donde se construían réplicas físicas idénticas de las naves para simular sus condiciones en tierra. Posteriormente, el concepto fue ampliado por Grieves en el contexto del Product Lifecycle Management (PLM), donde propuso un modelo virtual capaz de replicar, predecir y optimizar el comportamiento de un objeto físico a lo largo de su ciclo de vida.

En el ámbito del patrimonio cultural, los gemelos digitales permiten replicar edificios y entornos históricos con un alto nivel de precisión, integrando datos geométricos, históricos, estructurales y ambientales en una única plataforma inteligente. Su aplicación posibilita una supervisión continua del estado de conservación, así como simulaciones predictivas que facilitan la planificación preventiva de intervenciones. Esto es especialmente relevante en contextos patrimoniales complejos como iglesias, catedrales o centros históricos urbanos, donde las estructuras han evolucionado a lo largo del tiempo y presentan particularidades únicas.

Componentes de un gemelo digital patrimonial:

De forma general, un gemelo digital para el patrimonio se compone de tres elementos clave:

- El modelo físico (el edificio o sitio histórico real)
- El modelo virtual (réplica digital estructurada)
- El flujo de datos entre ambos, alimentado por sensores y sistemas de monitorización que permiten actualizaciones dinámicas.

En este marco, el modelo HBIM actúa como la base geométrica y semántica sobre la cual se articula el gemelo digital, integrando metodologías como el escaneo láser 3D, la fotogrametría, el análisis estructural y la inteligencia artificial para representar fielmente no solo la morfología del objeto patrimonial, sino también su comportamiento dinámico.

Figura 3



Figura 3. Interpretación de como el modelo integra varios componentes. montaje Elaboración propia



Aplicaciones y beneficios

Los gemelos digitales aplicados al patrimonio permiten:

- Supervisión estructural en tiempo real, mediante sistemas de Structural Health Monitoring (SHM) que recopilan datos de acelerómetros, sensores de temperatura o inclinómetros, entre otros.
- Simulación de escenarios de deterioro, daños estructurales o eventos extremos (terremotos, humedad, sobrecargas), permitiendo anticipar intervenciones con mayor precisión y sostenibilidad.
- Análisis histórico y evolutivo del bien patrimonial, registrando intervenciones previas, materiales originales y etapas constructivas.
- Experiencias inmersivas e interactivas para el público, mediante realidad virtual (VR), realidad aumentada (AR) o metaversos patrimoniales. En el caso de la ciudad de Suzhou, por ejemplo, se ha desarrollado un “escenario de gemelo digital” que permite recorrer e interactuar con espacios históricos en entornos virtuales, abriendo nuevas formas de consumo cultural y participación social.

2.4.1 Ejemplos representativos: Catedral de Milán y ciudad antigua de Suzhou

Los gemelos digitales en el ámbito patrimonial han comenzado a consolidarse gracias a una serie de casos emblemáticos que ejemplifican su potencial transformador. Dos de los más relevantes son la Catedral de Milán en Italia y la ciudad antigua de Suzhou en China. Ambos casos no solo ilustran los usos técnicos de esta tecnología, sino también sus dimensiones culturales, sociales y estratégicas.

1. Catedral de Milán: control estructural y mantenimiento predictivo

La Catedral de Milán ha sido uno de los primeros ejemplos europeos donde se ha aplicado un gemelo digital para la gestión integral del patrimonio construido. En este caso, el gemelo digital se diseñó con base en un modelo HBIM detallado, alimentado con datos obtenidos mediante escaneado láser y fotogrametría. Este modelo integra información sobre materiales, patologías y sistemas constructivos, permitiendo una monitorización continua mediante sensores IoT. (Angjeliu, Coronelli & Cardani, 2020)

Entre sus funcionalidades destaca la capacidad de simular posibles escenarios de deterioro estructural o ambiental y de anticipar intervenciones necesarias, reduciendo así los costes y riesgos asociados a la conservación tradicional. Además, se utilizó como herramienta de

análisis histórico y divulgación educativa, lo que refuerza su valor multidimensional. La experiencia de la Catedral de Milán demuestra cómo los gemelos digitales pueden convertirse en sistemas de soporte a la toma de decisiones, combinando el conocimiento arquitectónico con análisis predictivos en tiempo real. Figura 4

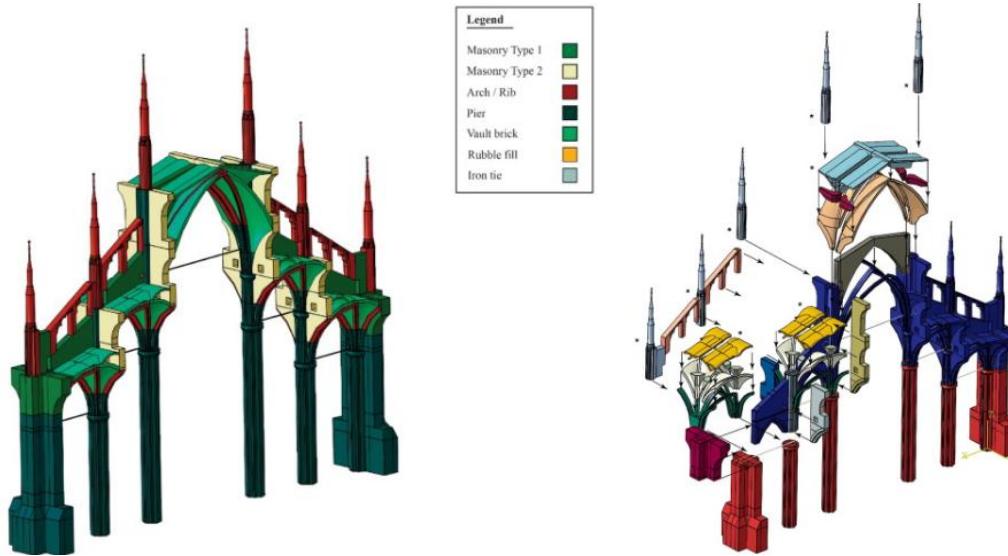


Figura 4 Modelo digital HBIM de la Catedral de Milán, representando diferentes materiales y componentes estructurales utilizados en el sistema de bóvedas y pilares. Este modelo fue desarrollado para integrar simulaciones estructurales en el marco de un gemelo digital patrimonial, permitiendo analizar el comportamiento físico del edificio en tiempo real. (Angjeliu, Coronelli & Cardani, 2020)

2. Suzhou: un ecosistema patrimonial digital y participativo

Por otro lado, el caso de la ciudad antigua de Suzhou representa un paradigma completamente distinto, pero igualmente innovador. En esta ciudad china con más de 2.500 años de historia, el gemelo digital no se aplica a un único edificio, sino a un tejido urbano completo de 19,2 km². Esta intervención parte de la plataforma CIM+ (City Information Modeling), sobre la cual se ha desarrollado un sistema de gemelo digital territorial que integra no solo el entorno construido, sino también los elementos naturales, sociales, económicos y culturales de la ciudad.

La ciudad se ha digitalizado a nivel de unidades espaciales mínimas (parcelas, bloques, calles), cada una con un código único que permite gestionar los datos relacionados con usos, regulaciones, elementos históricos, planificación urbana y actividades ciudadanas. El gemelo digital de Suzhou permite:

- Simular y gestionar flujos urbanos en tiempo real (turismo, tráfico, emergencias).

- Ejecutar políticas de protección patrimonial basadas en datos analíticos.
- Desarrollar experiencias inmersivas en el metaverso que combinan el patrimonio material con elementos culturales intangibles.Figura 5
- Fomentar el comercio digital de derivados culturales y la participación ciudadana en la revitalización del entorno histórico.Figura 6

Este enfoque integrador no solo se limita a la conservación física del patrimonio, sino que propone una revitalización cultural, económica y urbana mediante la digitalización inteligente. Su objetivo final no es solo la preservación, sino la creación de nuevos escenarios de vida que respeten el pasado mientras se proyectan hacia el futuro.



Figura 6. Plataforma CIM de la ciudad de Suzhou mostrando los niveles de información urbana mediante codificación visual. Fuente: Yang et al. (2024).



Figura 5. Recreación inmersiva de un entorno patrimonial de la ciudad antigua de Suzhou, desarrollada en entorno digital para visualización pública. Fuente: Yang et al. (2024).

Retos y perspectivas

A pesar de sus beneficios, la implementación de gemelos digitales en patrimonio enfrenta desafíos importantes:

- Complejidad en la integración de datos heterogéneos, especialmente en bienes con una extensa historia constructiva.
- Necesidad de infraestructura tecnológica avanzada, tanto en hardware como en software.
- Cuestiones éticas y legales, en relación con la propiedad de los datos patrimoniales, el uso comercial de los modelos y la autenticidad de la representación.



- Capacidad de simulación limitada, ya que muchas soluciones se centran en la visualización, pero no alcanzan aún un nivel predictivo avanzado en términos estructurales o ambientales.

En este contexto, la combinación de HBIM y gemelos digitales se perfila como una estrategia integral para abordar la conservación del patrimonio desde una perspectiva inteligente, inclusiva y sostenible. La aplicación a la Capilla de San Francisco de Borja, como caso de estudio, permitirá validar esta metodología en un entorno patrimonial real, explorando su potencial en términos de documentación, accesibilidad, simulación y experiencia cultural.

2.5. Accesibilidad e inclusión en entornos patrimoniales

La accesibilidad en el patrimonio cultural ha pasado de ser una cuestión técnica secundaria a convertirse en un eje central en las políticas de conservación, gestión y difusión cultural. En línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 10 (Reducción de desigualdades) y el ODS 11.4 (Protección del patrimonio cultural), se reconoce que todos los individuos —incluidas las personas con discapacidad— tienen derecho a acceder y participar plenamente de la vida cultural, lo que incluye el disfrute del patrimonio arquitectónico (UNESCO, 2015).

Esta visión ha impulsado el desarrollo de estrategias que favorezcan la inclusión, no solo física, sino también sensorial, cognitiva y digital. En este contexto, las tecnologías aplicadas al patrimonio, como el HBIM, la realidad virtual o la impresión 3D, abren nuevas posibilidades para democratizar el acceso y promover una experiencia cultural más equitativa y diversa (Bertacchi, 2022; Escudero, 2021).

Una de las líneas de trabajo más relevantes en los últimos años ha sido el uso de modelos táctiles impresos en 3D para facilitar la comprensión del patrimonio por parte de personas con discapacidad visual. Estos modelos permiten explorar formas, volúmenes y proporciones arquitectónicas de manera tangible, constituyendo una herramienta didáctica efectiva. Tal como destacan (Coughlan et al., 2023), el uso de impresión 3D para diseñar maquetas accesibles no solo mejora la inclusión en museos y sitios patrimoniales, sino que puede integrarse como un componente central en estrategias de mediación cultural universales. (Shahab et al., 2023)

Asimismo, la incorporación de experiencias inmersivas accesibles, como recorridos virtuales compatibles con lectores de pantalla, sistemas de navegación por voz o interfaces adaptadas a la movilidad reducida, contribuye a garantizar el acceso a espacios patrimoniales que pueden presentar barreras físicas insalvables. Estas soluciones, además,



amplían el impacto educativo del patrimonio y favorecen su divulgación a públicos escolares, rurales o con movilidad limitada.

No obstante, para que estas acciones sean efectivas, deben integrarse desde las primeras fases de documentación, modelado y diseño del proyecto patrimonial. La accesibilidad debe estar contemplada en los protocolos de ejecución HBIM, en la estructura semántica del modelo, en la forma en que se visualiza la información y en los productos derivados generados para difusión. Tal como recomienda la Guía BIM-Patrimonio Cultural (2023), los criterios de diseño universal deben formar parte del flujo de trabajo digital, garantizando una metodología replicable y sensible a la diversidad del público.

El caso de la Capilla de San Francisco de Borja, como objeto de estudio de este trabajo, incorpora estas consideraciones mediante el desarrollo de modelos HBIM orientados a la producción de prototipos táctiles y entornos digitales accesibles, proponiendo así un enfoque innovador para la gestión inclusiva del patrimonio cultural.

2.6. Realidad aumentada y virtual en la difusión del patrimonio

La realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) se han consolidado como herramientas clave para la reinterpretación, difusión y accesibilidad del patrimonio cultural, especialmente en un contexto donde la digitalización avanza como eje estratégico para la conservación y puesta en valor. Estas tecnologías permiten representar de forma inmersiva e interactiva bienes patrimoniales, tanto en su estado actual como en sus fases históricas, facilitando nuevas formas de comprensión y acercamiento por parte del público (Escudero, 2021).

En el ámbito de la realidad virtual, las experiencias desarrolladas permiten al usuario sumergirse en entornos patrimoniales tridimensionales a través de modelos generados con tecnologías como HBIM, escáner láser o fotogrametría, facilitando la visita virtual a espacios que pueden estar inaccesibles por motivos físicos, logísticos o de conservación (Bertacchi, 2022). Por su parte, la realidad aumentada complementa la visita presencial mediante la superposición de información histórica, constructiva o simbólica, mejorando así la comprensión contextual del bien patrimonial en tiempo real (Guía BIM-Patrimonio Cultural, 2023).

Casos como el del gemelo digital inmersivo de la ciudad de Suzhou, en China, muestran cómo la combinación de VR, AR y HBIM ha permitido crear experiencias patrimoniales híbridas —presenciales y digitales— que integran tanto el patrimonio material como el inmaterial. Este entorno virtual no solo funciona como espacio expositivo, sino también



como plataforma de simulación, formación y participación ciudadana, abriendo nuevas dimensiones de gestión y divulgación cultural (Yang, Huang & Zhou, 2024).

Asimismo, el proyecto aplicado a la Ópera de Sídney demuestra cómo los entornos inmersivos pueden utilizarse para evaluar el valor histórico de los procesos constructivos y documentar la evolución de un edificio emblemático mediante secuencias narrativas, simulaciones estructurales e interacción lúdica con los modelos digitales (Cardellicchio, Stracchi & Globa, 2024). Esta combinación entre visualización avanzada y estrategias educativas ha favorecido una mayor apropiación social del patrimonio, generando vínculos emocionales y nuevas formas de transmisión intergeneracional del conocimiento arquitectónico.

No obstante, la implementación de estas tecnologías debe estar guiada por principios éticos y metodológicos, como los propuestos en la Carta de Londres (2009) y los Principios de Sevilla (2011), que abogan por una representación fidedigna, verificable, documentada y accesible del patrimonio digital. Asimismo, la Guía BIM-Patrimonio Cultural (2023) insiste en que la inclusión de VR y AR debe integrarse desde las fases iniciales del proyecto, considerando su viabilidad técnica, sus objetivos educativos y su adecuación al público destinatario.

En definitiva, la realidad virtual y aumentada se configuran como una vía eficaz para expandir el acceso al patrimonio cultural, mejorar su comprensión y conectar emocionalmente a las audiencias con entornos históricos. Su inclusión en proyectos patrimoniales como el de la Capilla de San Francisco de Borja refuerza el compromiso con una difusión accesible, participativa y tecnológicamente innovadora.

3. Metodología

3.1. Enfoque metodológico y estructura general de la investigación

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y cualitativo, fundamentado en el desarrollo de un estudio de caso único: la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en la Catedral de Valencia. Este enfoque permite una aproximación holística al análisis y gestión del patrimonio construido, integrando metodologías digitales (HBIM, escaneado láser, modelado paramétrico) con estrategias inclusivas e inmersivas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Desde una perspectiva metodológica, se opta por una estrategia interdisciplinaria, que articula técnicas de documentación arquitectónica, tecnologías de modelado de información, principios de conservación patrimonial y herramientas de visualización digital. Esta línea de trabajo se sustenta en referentes académicos consolidados que han demostrado la



efectividad del uso de modelos HBIM como plataforma para centralizar datos heterogéneos y facilitar la toma de decisiones en contextos patrimoniales complejos (Escudero, 2021; Bertacchi, 2022).

La investigación se estructura en seis fases metodológicas, que responden directamente a los objetivos específicos definidos en el capítulo introductorio. Estas fases, aunque descritas de forma secuencial, se desarrollan con un grado variable de solapamiento y retroalimentación entre ellas, de acuerdo con la lógica iterativa de los procesos de documentación y modelado en entornos patrimoniales (Murphy et al., 2009; García-Valldecabres et al., 2023).

Las fases son las siguientes:

Fase I. Análisis documental e histórico: Incluye la revisión de bibliografía especializada, fuentes archivísticas, normativas aplicables y estudios previos sobre la capilla y su contexto urbano-arquitectónico. Esta etapa sienta las bases conceptuales y contextuales del proyecto.

Fase II. Levantamiento y diagnóstico del bien patrimonial: Comprende el trabajo de campo mediante escaneado láser 3D, fotogrametría digital, y una evaluación del estado de conservación que incluye la identificación de patologías materiales y estructurales.

Fase III. Desarrollo del modelo HBIM y planificación de gestión digital: A partir de los datos obtenidos, se genera un modelo HBIM detallado e informativo, estructurado mediante un Plan de Ejecución BIM (BEP) adaptado al entorno patrimonial, que permite integrar información geométrica, histórica y técnica de manera coherente.

Fase IV. Construcción del gemelo digital y entornos inmersivos: Sobre la base del modelo HBIM, se implementan estrategias de visualización avanzada, incluyendo experiencias inmersivas en realidad virtual (VR) y aumentada (AR), como herramientas para la difusión y exploración del bien patrimonial.

Fase V. Accesibilidad e inclusión en la experiencia patrimonial: Esta etapa contempla la creación de modelos táctiles impresos en 3D y el diseño de interfaces digitales accesibles, con el fin de garantizar el acceso equitativo a los contenidos patrimoniales a públicos con distintas capacidades.

Fase VI. Evaluación del proceso y aplicabilidad metodológica: Finalmente, se reflexiona sobre la eficacia del protocolo desarrollado, su replicabilidad en otros entornos, y su



alineación con los ODS, considerando tanto los resultados obtenidos como las limitaciones metodológicas encontradas.

Esta estructura metodológica no solo permite desarrollar una documentación precisa y completa del caso de estudio, sino también plantear un modelo de gestión inteligente del patrimonio que pueda ser replicable y escalable, contribuyendo al avance en la digitalización, conservación y democratización del acceso al patrimonio arquitectónico.

3.2. Selección del caso de estudio: La Capilla de San Francisco de Borja

La elección de la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en el crucero de la Catedral de Valencia, responde a una serie de criterios metodológicos y científicos que la convierten en un objeto de estudio idóneo para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Máster. Esta capilla, adscrita al programa arquitectónico neoclásico de transformación del templo en el siglo XVIII, constituye un enclave singular tanto por su valor histórico y artístico como por sus condiciones actuales de conservación y su potencial para la aplicación de metodologías digitales avanzadas.

La selección de este caso se sustenta en los siguientes criterios:

Relevancia histórica y arquitectónica

La capilla refleja de forma paradigmática los procesos de transformación histórica que han tenido lugar en la Catedral de Valencia, especialmente durante el periodo neoclásico. Esta condición la convierte en un testimonio representativo del patrimonio eclesiástico valenciano y en un espacio significativo dentro del conjunto catedralicio, cuyo estudio permite abordar la complejidad estratigráfica, simbólica y constructiva de los bienes históricos.

Estado de conservación y necesidad de intervención documentada

Aunque no presenta un estado de ruina, la capilla evidencia signos visibles de deterioro en materiales, acabados y estructuras decorativas. Esta situación plantea la necesidad de una intervención no invasiva que permita documentar su estado actual, planificar futuras acciones de conservación y evaluar su evolución a través de estrategias de monitoreo y mantenimiento preventivo basadas en entornos digitales.

Adecuación al uso de tecnologías HBIM y gemelo digital

La geometría de la capilla, su grado de complejidad formal y la disponibilidad de documentación previa (planos históricos, escaneos, estudios parciales) hacen de ella un caso especialmente favorable para la aplicación de metodologías basadas en Heritage Building



Information Modeling (HBIM), así como para la construcción de un gemelo digital patrimonial orientado a la gestión inteligente del bien.

Valor artístico y potencial de divulgación accesible

La capilla alberga una serie de elementos artísticos de gran valor, entre los que destaca la presencia de pinturas atribuidas a Francisco de Goya. Esta dimensión artística refuerza su idoneidad como objeto de estrategias de accesibilidad e inclusión, permitiendo el desarrollo de recursos didácticos adaptados, modelos táctiles, experiencias inmersivas y contenidos digitales accesibles.

En conjunto, la Capilla de San Francisco de Borja reúne las condiciones necesarias para el cumplimiento de los objetivos propuestos en esta investigación, al tiempo que ofrece una oportunidad para experimentar con soluciones metodológicas innovadoras que podrían extrapolarse a otros bienes patrimoniales con características similares.

3.3. Fase 1: Revisión documental e histórica

La primera fase del trabajo se centra en la construcción del marco de conocimiento necesario para fundamentar teóricamente, contextualizar históricamente y orientar metodológicamente la investigación. Esta etapa implica dos líneas de acción complementarias: por un lado, la revisión bibliográfica especializada en torno a la gestión digital del patrimonio, las metodologías HBIM y las estrategias de accesibilidad e inmersión cultural; y por otro, la recopilación y análisis crítico de fuentes primarias y secundarias específicas sobre la Capilla de San Francisco de Borja y su entorno arquitectónico, histórico y urbano.

3.3.1. Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte

Esta subfase tiene como objetivo identificar y analizar los referentes teóricos, metodológicos y técnicos que sustentan el desarrollo del presente TFM. Se ha realizado una revisión sistemática de literatura académica, informes técnicos, normativas nacionales e internacionales, y estudios de caso vinculados con el uso de tecnologías digitales en el patrimonio arquitectónico. La búsqueda se ha centrado especialmente en tres líneas temáticas principales:

Evolución del Building Information Modeling (BIM) y su adaptación al patrimonio (HBIM), destacando los trabajos de Murphy et al. (2009), Dore & Murphy (2017), Bertacchi (2022) y Yang et al. (2020), quienes profundizan en los desafíos y oportunidades que representa la modelación paramétrica en contextos históricos.

Aplicación de gemelos digitales en patrimonio cultural, abordada desde su potencial para integrar información heterogénea, facilitar la toma de decisiones y simular procesos de



conservación, como se observa en los casos documentados por Hou et al. (2023) en Suzhou en modelos híbridos de gestión patrimonial inteligente.

Accesibilidad, inclusión y difusión del patrimonio mediante tecnologías inmersivas, tomando como base estudios recientes sobre experiencias VR/AR aplicadas a la museografía interactiva, el diseño de modelos táctiles y los entornos virtuales adaptativos (Sanfilippo et al., 2023).

La revisión ha permitido detectar las principales tendencias, enfoques metodológicos y vacíos existentes en la literatura, y ha servido para construir un marco de referencia sólido sobre el cual se articula el protocolo propuesto en este trabajo. Se ha prestado especial atención a los trabajos previos desarrollados en el contexto español y, particularmente, en la Comunidad Valenciana, incluyendo tesis y artículos centrados en bienes como la Iglesia de San Lorenzo, el San Juan del Hospital o el Real Club Náutico de San Sebastián, los cuales han aportado pautas metodológicas comparables. Todos esos documentos se encuentran en la propia bibliografía de este trabajo y buscan mostrar como este no sería un caso aislado, sino que también se encuentran otros casos en los que la metodología HBIM ha sido utilizada, aplicada y correctamente aprovechada en el contexto de la ciudad.

3.3.2. Recopilación de fuentes primarias y secundarias

En paralelo a la revisión bibliográfica, se ha llevado a cabo una recopilación exhaustiva de documentación específica relacionada con la Capilla de San Francisco de Borja. Este trabajo ha incluido tanto fuentes primarias como secundarias, con el objetivo de reconstruir el contexto histórico, material y simbólico del bien patrimonial objeto de estudio.

Entre las fuentes primarias consultadas se encuentran:

- Planos históricos y levantamientos gráficos procedentes del archivo del Cabildo Catedralicio de Valencia.
- Documentos notariales, registros litúrgicos y actas de intervención conservados en el Archivo Histórico Diocesano y el Archivo del Reino de Valencia.
- Fotografías antiguas, informes técnicos y estudios inéditos localizados en el fondo documental de la Universitat Politècnica de València.

En cuanto a las fuentes secundarias, se han considerado:



- Estudios históricos, artísticos y arquitectónicos sobre la Catedral de Valencia y sus capillas, como los trabajos de Cortés (2014), así como artículos académicos sobre la transformación neoclásica del conjunto catedralicio.
- Guías patrimoniales, normativas de intervención en bienes de interés cultural (BIC), y documentos oficiales como el Plan Director de la Catedral, que proporciona una base para entender los criterios de gestión y conservación vigentes.

La combinación de ambas líneas de investigación documental ha sido fundamental para:

- Delimitar el objeto de estudio desde una perspectiva histórica y técnica rigurosa.
- Identificar las intervenciones anteriores realizadas sobre la capilla.
- Determinar los materiales, técnicas constructivas y valores patrimoniales que deben ser incorporados al modelo HBIM.
- Asegurar que las decisiones metodológicas posteriores se basen en evidencia documental verificable.

Esta primera fase, por tanto, no solo ha contribuido a la fundamentación teórica y contextual del proyecto, sino que ha establecido los parámetros iniciales para el desarrollo del modelo digital, la estructuración de la base de datos y la planificación de estrategias de conservación, accesibilidad y difusión que serán desarrolladas en las siguientes fases del trabajo.

3.4. Fase 2: Levantamiento y diagnóstico del bien patrimonial

Esta fase tiene como objetivo principal la obtención de información precisa y actualizada sobre el estado físico y material de la Capilla de San Francisco de Borja. El trabajo se divide en dos acciones fundamentales: la captura digital de alta precisión mediante escaneo láser y fotogrametría, y la evaluación diagnóstica de su estado de conservación, centrada en la identificación y cartografía de patologías materiales. Ambas acciones son esenciales para generar un modelo HBIM fiable y una estrategia de conservación fundamentada.

Cabe señalar que las nubes de puntos utilizadas en esta investigación fueron previamente generadas en el marco del proyecto de investigación competitivo “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del patrimonio cultural de un destino” (ref. PID2020-119088RB-I00), financiado por la Agencia Estatal de Investigación. Este proyecto, desarrollado entre el 1 de septiembre de 2022 y el 31 de agosto de 2024, tiene como objetivo principal analizar el potencial práctico de la



integración HBIM-SIG mediante casos de estudio, con el fin de generar herramientas metodológicas aplicables a la planificación, valorización y gestión del turismo cultural (<https://hbimsigtur.webs.upv.es/proyecto-y-objetivos/>).

Aunque los datos geométricos base fueron proporcionados por dicho proyecto, en el presente TFM se incluye una descripción detallada del procedimiento metodológico para la captura digital de datos (véase apartado 3.4.1), con el propósito de garantizar la replicabilidad de la metodología propuesta. Se ha considerado fundamental explicar las fases, técnicas y criterios que deberían seguirse en un levantamiento mediante escaneo láser 3D y fotogrametría en un contexto patrimonial similar, de modo que el protocolo desarrollado pueda ser aplicado en futuros proyectos o casos análogos.

3.4.1. Trabajo de campo: escaneo láser 3D y fotogrametría

La captura geométrica del caso de estudio se realizó mediante escaneo láser 3D, complementado con técnicas de fotogrametría digital para mejorar la resolución de los detalles decorativos. El objetivo fue generar una nube de puntos densa, precisa y georreferenciada, que sirviera como base geométrica del modelo HBIM a desarrollar en fases posteriores.

El procedimiento metodológico se estructuró en las siguientes etapas:

Planificación de la campaña de escaneo: Antes de la adquisición de datos, se realizará una planificación exhaustiva que incluirá la definición de las áreas a escanear (interior y exterior de la capilla, elementos arquitectónicos relevantes), la selección de la ubicación estratégica de las estaciones de escaneo para garantizar una cobertura completa y minimizar las zonas de sombra, y la determinación de la resolución y la densidad de puntos necesarias para capturar el nivel de detalle requerido para los objetivos de la investigación.

Captura de datos y referenciación espacial: Se emplearon esferas y dianas reflectantes para permitir la alineación posterior de las distintas tomas, utilizando software especializado de registro. La resolución fue calibrada para alcanzar un nivel de detalle suficiente que permitiera modelar incluso elementos ornamentales.

Adquisición de datos mediante escaneo láser 3D: Se utilizará un escáner láser 3D de alta precisión para realizar la captura de datos en las estaciones previamente definidas. Durante el escaneo, el dispositivo emitirá millones de pulsos láser que rebotarán en las superficies de la capilla, registrando la distancia, la intensidad del retorno y, en algunos casos, información de color (RGB).

Procesamiento y limpieza de la nube de puntos: Se filtraron puntos ruidosos, se eliminaron solapamientos, y se optimizó el conjunto para su manejo posterior. El producto final fue una nube de puntos unificada y optimizada, con información métrica y visual del conjunto escaneado, adecuada para su importación en entornos BIM (Escudero, 2021).

Tal como se detalla en estudios metodológicos recientes, esta fase constituye una de las etapas clave del flujo de trabajo Scan-to-BIM, ya que garantiza la precisión dimensional del modelo y permite documentar fielmente las deformaciones y particularidades del edificio histórico (Escudero, 2021).

3.4.2. Evaluación del estado de conservación y cartografía de daños

Una vez obtenida la base geométrica, se procedió a la evaluación visual y analítica del estado de conservación de la capilla, centrando la atención en los materiales, acabados y estructuras ornamentales. Esta evaluación permitió identificar síntomas de deterioro visibles (fisuras, eflorescencias, desprendimientos, humedades) y establecer su localización, extensión y posible causa.

El procedimiento se desarrolló con base en una metodología HBIM de registro de patologías, que consistió en:

La elaboración de documentación 2D y ortofotos sobre alzados y secciones del edificio.

Figura 8Figura 7



Figura 7. Análisis estratigráfico cromático de la fachada izquierda de la Capilla de San Francisco de Borja. Parte del estudio de diagnóstico visual del estado superficial de los muros. Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Análisis estratigráfico cromático de la fachada derecha de la Capilla de San Francisco de Borja. Ilustración basada en observación directa y documentación fotográfica. Fuente: elaboración propia.

La vinculación de información sobre patologías a los elementos del modelo HBIM, asociando atributos como tipología, grado de severidad, localización, superficie afectada y recomendaciones preliminares (Escudero, 2021).



Este enfoque, propuesto en experiencias previas como el caso de la Iglesia de San Lorenzo, permite cuantificar con precisión la superficie afectada, generar cartografías de daños tridimensionales y sentar las bases para la conservación preventiva, al incorporar las lesiones como propiedades del modelo digital (Escudero, 2021).

Además, se siguieron las directrices del Plan Nacional de Conservación Preventiva (2011), integradas en la Guía BIM-Patrimonio Cultural, que recomiendan registrar las alteraciones mediante bases de datos abiertas con imágenes, esquemas e históricos, incorporadas a los modelos digitales para facilitar su monitorización a lo largo del tiempo.

En conjunto, esta fase ha permitido disponer de una base de información geométrica y patológica fiable, que constituye un soporte indispensable para el desarrollo posterior del modelo HBIM, el gemelo digital y las estrategias de conservación, accesibilidad y difusión del patrimonio.

3.5. Fase 3: Plan de Ejecución HBIM (BEP) y diseño de protocolos

El Plan de Ejecución BIM (BEP) representa la columna vertebral de cualquier proyecto basado en modelado digital colaborativo, ya que define los objetivos, procedimientos, responsabilidades, formatos y estándares que regulan el desarrollo del modelo en todas sus fases. En el ámbito del patrimonio construido, esta herramienta adquiere un carácter estratégico, pues permite coordinar información técnica, documental y cultural en entornos digitalizados de alta complejidad (Marquinho del Pezo, 2023).

3.5.1. Definición del BEP aplicado al entorno patrimonial

En el presente trabajo, el BEP ha sido adaptado para responder a las necesidades y especificidades de un bien patrimonial de carácter singular como la Capilla de San Francisco de Borja. Su elaboración se ha basado en la metodología descrita en la BIM Project Execution Planning Guide (CIC Research Group, 2010) y en las buenas prácticas recogidas en estudios aplicados como los de Escudero (2021) e Isabel Jordán (2022), quienes proponen protocolos patrimoniales orientados a garantizar la coherencia, trazabilidad y reutilización de los modelos HBIM.

El BEP desarrollado en este TFM incluye las siguientes secciones fundamentales:

a) Objetivos del modelado

Se definen los usos del modelo HBIM, que orientan el nivel de precisión requerido y la estructura de la información. En este caso, los principales usos son:



- Documentación gráfica y planimétrica del bien.
- Registro y análisis de patologías materiales.
- Gestión del ciclo de vida y conservación preventiva.
- Generación de entornos inmersivos (VR/AR) y modelos táctiles.
- Visualización interactiva con enfoque educativo y accesible.

Tabla 1 Tabla de Estructura del Plan de Ejecución HBIM (HBEP) fuente: elaboración propia

Sección del HBEP	Descripción	Adaptación al caso patrimonial de la Capilla de San Francisco de Borja
a) Objetivos del modelado	Define los usos del modelo (documentación, análisis de patologías, conservación, difusión, accesibilidad).	Enfocado a documentación precisa, VR, prototipos inclusivos, y visualización educativa accesible.
b) Niveles LOD y LOI	Establece el nivel geométrico (LOD 400-500) y de información según tipo de elemento.	LOD alto para VR; LOI diferenciado según valor estructural, artístico o funcional.
c) Niveles de Conocimiento (LOK)	Define el grado de conocimiento patrimonial documentado de cada componente del modelo.	Se aplican niveles de LOK para gestionar incertidumbres históricas y trazabilidad documental.
d) Clasificación y codificación	Organización jerárquica del modelo: familias, subcategorías y código alfanumérico único.	Clasificación por función litúrgica, etapa constructiva e importancia patrimonial.
e) Herramientas, formatos y flujo de trabajo	Describe software, formatos y procesos.	Revit + Unreal Engine (Datasmith), ReCap, Navisworks, y vinculación con bases de datos externas.
f) Organización del equipo	Define roles y responsabilidades (aunque el trabajo es unipersonal, se proponen roles replicables).	Incluye coordinadores HBIM, accesibilidad, documentación y VR/AR.
g) Control de versiones y trazabilidad	Establece protocolo de nombrado, control de versiones y registro de cambios.	Asegura trazabilidad del modelo, replicabilidad y auditoría de procesos.

b) Niveles de detalle (LOD) y de información (LOI)

Siguiendo las recomendaciones del BuildingSMART (2023) y tomando como referencia los criterios observados en trabajos previos aplicados al patrimonio, se ha optado por establecer un nivel de desarrollo geométrico (LOD) entre 400 y 500 Figura 9, lo cual permite alcanzar una representación fiel y precisa de los elementos arquitectónicos, sin llegar a un nivel de detalle constructivo completo. Esta decisión responde no solo a los requerimientos propios del modelado patrimonial, sino también a la necesidad de contar con un modelo altamente definido y optimizado para su uso en entornos de realidad virtual (VR) y experiencias inmersivas, donde la calidad visual y la coherencia geométrica resultan factores clave para la eficacia comunicativa y sensorial del entorno.



Figura 9. Niveles de desarrollo geométrico (LOD) en entornos BIM. La imagen resume de forma comparativa los cinco niveles de detalle (LOD 100 a LOD 500) Fuente: (Morea Núñez & Zaragoza Angulo, 2015).

En cuanto al nivel de información (LOI), se ha adoptado una estrategia diferenciada según el tipo de elemento representado. Para elementos estructurales, artísticos o decorativos con alta carga simbólica o patrimonial, se ha incorporado una mayor densidad informativa, incluyendo metadatos históricos, referencias documentales y datos de conservación. Para elementos secundarios, se ha optado por un LOI intermedio, suficiente para mantener la coherencia del modelo sin sobrecargar la base de datos.

- Elementos estructurales → LOI elevado: incluye material, técnica, estado de conservación, intervenciones pasadas.
- Elementos ornamentales → LOI medio: geometría precisa + metadatos históricos/artísticos.
- Elementos auxiliares → LOI básico: nombre, ubicación y función.

c) Niveles de Conocimiento (LOK) en HBIM

La incorporación de los Niveles de Conocimiento (LOK) al modelo HBIM constituye una adaptación fundamental del concepto de Level of Development (LOD), típico del BIM aplicado a edificaciones nuevas, al contexto del patrimonio cultural. Propuesto por Castellano-Román y Pinto-Puerto (2019), el concepto de LOK redefine las etapas del desarrollo del



modelo en términos de conocimiento patrimonial, permitiendo valorar no sólo el grado de precisión geométrica sino, sobre todo, la calidad y profundidad del conocimiento disponible sobre el bien.

El sistema de LOK se estructura en cinco niveles, paralelos a los estándares del LOD, pero con una orientación epistemológica y metodológica distinta:

LOK100: Identificación

- Representación gráfica simbólica o genérica del bien, sin necesidad de categorización formal.
- Información básica de localización y caracterización.
- Utilizado para inventarios iniciales o reconocimientos patrimoniales sin intervención directa.

LOK200: Protección y difusión

- Modelado básico de la estructura con finalidad de soporte legal y estratégico.
- Suficiente para justificar la protección jurídica del bien y servir como apoyo gráfico para planes maestros.
- Incorporación de un repositorio documental vinculado (Heritage Building Information Repository - HBIR).

LOK300: Investigación avanzada

- Modelado de estructuras complejas y caracterización material detallada.
- Se incorporan diagnósticos multidisciplinares (arqueológicos, estructurales, etc.).
- Es el nivel previo necesario para cualquier propuesta de intervención.

LOK400: Conservación e intervención

- Preparación de proyectos específicos de intervención y conservación.
- Requiere información técnica, normativa y procedimental precisa.

LOK500: Gestión integral

- El modelo se utiliza como herramienta activa de gestión y mantenimiento periódico del bien.
- Incluye programación de investigación, conservación preventiva, uso y difusión del patrimonio.

Estos niveles permiten una evolución progresiva del modelo, adaptándose a las necesidades reales del bien y al estado del conocimiento disponible en cada momento. Su implementación resulta particularmente útil en contextos complejos, como en el caso de la Capilla de San Francisco de Borja, donde el conocimiento de las fases históricas, materiales, valores simbólicos y estado de conservación no es homogéneo en todo el conjunto.

La siguiente imagen, extraída del artículo de Castellano-Román y Pinto-Puerto (2019), ilustra de forma clara la progresión visual y conceptual entre los distintos niveles de conocimiento: Figura 10



Figura 10. Esquema de caracterización del nivel de conocimiento LOK en HBIM. Fuente: (Castellano Román y Pinto Puerto, 2019)

Esta caracterización contribuye significativamente a establecer un modelo HBIM funcional no sólo como archivo geométrico, sino como un sistema de gestión del conocimiento patrimonial en el que confluyen datos históricos, constructivos, técnicos y culturales.

d) Clasificación de elementos y codificación

El modelo se ha estructurado jerárquicamente por niveles espaciales, elementos constructivos y etapas históricas, de acuerdo con las recomendaciones de Escudero (2021) y la Guía BIM-Patrimonio (buildingSMART, 2023). Se utiliza un sistema de codificación alfanumérico para identificar:

- Familia BIM (muro, bóveda, pilastra...)
- Subcategoría (estructural, decorativa, litúrgica...)

- Identificador único (ID) vinculado a la base de datos del modelo Figura 11.

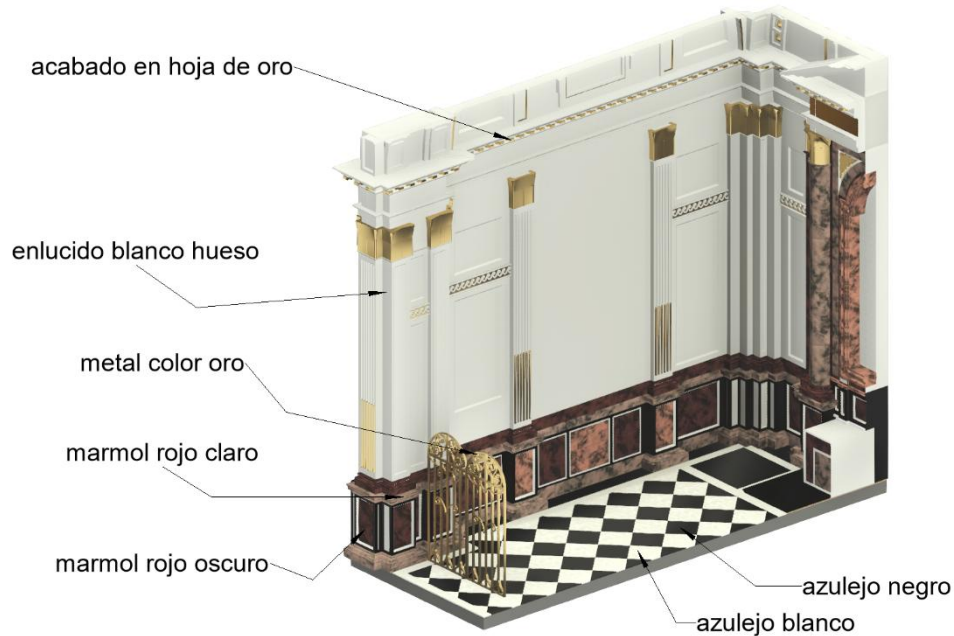


Figura 11. Esquema con identificadores únicos de material vinculados al modelo. Fuente: elaboración propia

e) Herramientas, formatos y flujo de trabajo

El BEP detalla las herramientas utilizadas en cada etapa del proceso y también un conjunto de decisiones previas para la implementación HBIM:

- **Elección del software BIM:** Para el desarrollo del modelo HBIM en el presente trabajo se ha optado por el uso de Autodesk Revit 2024, debido a su robustez en el manejo de geometrías complejas, su amplia compatibilidad con múltiples formatos de intercambio (como IFC, DWG, FBX y OBJ), y su capacidad para estructurar la información patrimonial de forma organizada y paramétrica. Esta versatilidad resulta fundamental para la generación de un repositorio de datos integrado, en el que confluyen información geométrica, histórica y de conservación.

Además, uno de los factores determinantes en la elección de Revit ha sido su interacción optimizada con el motor gráfico Unreal Engine, facilitada a través del plugin Datasmith, que permite realizar la exportación directa y eficiente del modelo hacia entornos de visualización inmersiva. Este flujo de trabajo HBIM-to-VR resulta esencial para garantizar la fidelidad geométrica, la transferencia de materiales y la actualización dinámica de los modelos en tiempo real.



- Para la creación del entorno inmersivo y la experiencia interactiva basada en el modelo HBIM, se ha seleccionado el motor **Unreal Engine 5**. Esta elección responde a varias razones fundamentales: en primer lugar, su capacidad para manejar escenas de alta complejidad geométrica con optimización avanzada de recursos gracias a tecnologías como Nanite (renderizado de geometría virtualizada) y Lumen (iluminación dinámica global), permite trasladar fielmente la riqueza formal y material de la Capilla de San Francisco de Borja al entorno virtual sin comprometer la fluidez de la experiencia.

Además, Unreal Engine ofrece una integración directa y eficiente con archivos procedentes de Revit mediante el uso del plugin Datasmith, lo que facilita la transferencia de modelos complejos manteniendo materiales, geometrías, jerarquías de objetos y metadatos asociados. Esta capacidad resulta crucial para garantizar la coherencia entre el modelo HBIM y su representación inmersiva.

Otro factor decisivo ha sido la versatilidad multiplataforma de Unreal Engine, que permite adaptar el proyecto a distintas modalidades de visualización (Realidad Virtual, Realidad Aumentada, desktop interactivo, etc.), aumentando la accesibilidad de la experiencia a distintos públicos y dispositivos. Su compatibilidad con dispositivos de realidad virtual (como Oculus Rift o HTC Vive) y entornos de realidad aumentada ofrece amplias posibilidades de difusión, accesibilidad y gamificación del patrimonio, en línea con los objetivos del proyecto.

Finalmente, la comunidad activa de desarrolladores, la disponibilidad de recursos abiertos, y la posibilidad de personalización avanzada mediante Blueprints y programación en C++, consolidan a Unreal Engine 5 como una herramienta idónea para proyectos de innovación patrimonial basados en tecnologías inmersivas.

- Como herramientas complementarias dentro del flujo de trabajo, se emplearon **Autodesk Navisworks** y **Autodesk ReCap**. ReCap fue utilizado para la gestión, limpieza y optimización de las nubes de puntos obtenidas a partir del escaneo láser 3D, facilitando su posterior importación y alineación en el entorno de modelado. Por su parte, Navisworks permitió realizar revisiones coordinadas del modelo HBIM, optimizando la detección de inconsistencias geométricas y asegurando la correcta integración de los datos antes de su exportación para usos inmersivos. Estas herramientas garantizaron un control de calidad efectivo en el tratamiento y validación de la información geométrica.
- Excel y Access (gestión y vinculación de bases de datos)

Los formatos archivos definidos en la generación del repositorio HBIM también incluyen archivos externos a la plataforma BIM, como imágenes (.png, .bmp, .tif y .jpg), textos (.txt y .doc), datos en pdf (.pdf), nubes de puntos (.rcp, .rcs) y geometrías 2D/3D (.dwg, .dxf, .dgn, .sat y .skp). También existen archivos propios de la plataforma de Revit (.rvt, .rfa, .adsk y .rte). Por último existen los archivos de colaboración IFC (.ifc .ifcXML .ifczip) y OBJ/FBX .udatasmith (exportación a VR/AR).



Figura 12. Clasificación de softwares BIM según sus dimensiones de aplicación. Fuente: Escudero (2021, p. 159).

f) Organización del equipo y responsabilidades

Aunque el presente trabajo es de carácter académico y unipersonal, el BEP incluye un esquema de roles replicables para su uso futuro en proyectos colaborativos: Figura 13

- Coordinador HBIM
- Coordinador HBIM estructuras
- Coordinador de arqueología
- Responsable de documentación histórica
- Modelador BIM patrimonial
- Especialista en visualización/VR
- Coordinador de gestión turística
- Responsable de accesibilidad e inclusión

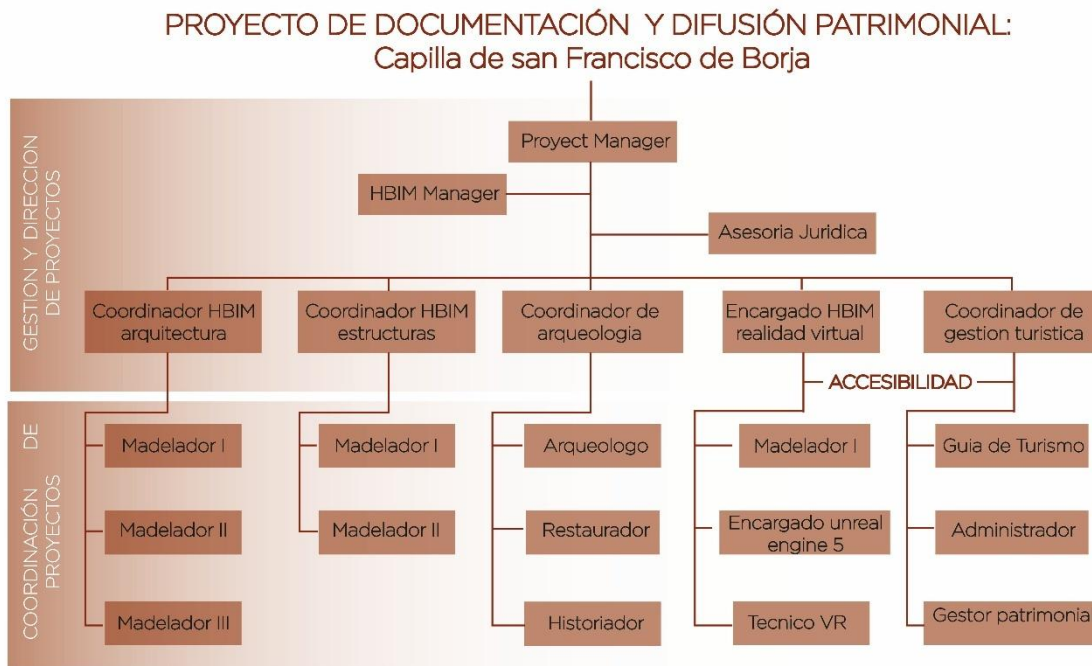


Figura 13. ORGANIGRAMA DE LOS EQUIPOS HBIM propuesto para el proyecto de documentación y difusión patrimonial de la Capilla de San Francisco de Borja. **Fuente:** Elaboración propia, adaptado de (Marquinho Del Pezo Manyà, 2023)

g) Protocolo de nombrado, control de versiones y trazabilidad

Se ha desarrollado un sistema de control para:



- Estructura de carpetas y archivos
- Versión del modelo y fichas asociadas
- Registro de cambios y comentarios

Esto garantiza la trazabilidad del modelo a lo largo de su evolución y permite generar auditorías internas del flujo de trabajo.

Este BEP actúa como la hoja de ruta del modelo HBIM, garantizando su coherencia técnica, histórica y operativa. Su integración en el flujo de trabajo no solo responde a criterios de calidad metodológica, sino que permite estructurar el modelo como un verdadero sistema de gestión patrimonial digital. Además, su desarrollo facilita la replicabilidad del protocolo en futuros proyectos, tanto en entornos catedralicios como en otros bienes culturales con características similares.

INFORMACIÓN DEL PROYECTO	
CLIENTE	ADMINISTRACION Y GESTION CULTURAL DE LA CATEDRAL
PROPIEDAD	IGLESIA CATEDRAL BASILICA METROPOLITANA DE LA ASUNCIÓN DE NUESTRA SEÑORA SANTA MARÍA DE VALENCIA
NOMBRE PROYECTO	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA HBIM-VR PARA LA DOCUMENTACIÓN Y DIFUSIÓN PATRIMONIAL: CAPILLA DE SAN FRANCISCO DE BORJA DE LA CATEDRAL DE VALÈNCIA
DIRECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL	VALENCIA, ESPAÑA
TIPO DE TRABAJO	INVESTIGACIÓN A NIVEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER, MODELADO PARA DIFUSION DEL BIEN PATRIMONIOAL
BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	CAPILLA DE SAN FRANCISCO DE BORJA, CATEDRAL DE VALENCIA Pl. de l'Almoina, s/n, 46003 23 de junio 1262 Estilo románico, gótico valenciano, renacentista, barroco y neoclásico.

Tabla 2. INFORMACION DE PROYECTO HBIM. Fuente: Elaboración propia adaptada de Marquiño del Pezo Manyà (2021).

PRIORIDAD	Objetivos del modelo HBIM	Usos asociados
ALTA	Centralizar y estructurar la información arquitectónica, geométrica, histórica y material de la Capilla de San Francisco de Borja.	Documentación del bien patrimonial Integración de datos históricos
ALTA	Facilitar la generación de documentación precisa para la conservación y el diagnóstico mediante modelado HBIM.	Análisis del estado de conservación Obtención de documentación 2D y 3D
ALTA	Desarrollar un gemelo digital interoperable que permita visualización inmersiva en RA/RV.	Visualización inmersiva Experiencias interactivas en RA/RV (accesibilidad)
MEDIA	Implementar un sistema de gestión que integre datos de accesibilidad e inclusión.	Diseño de estrategias inclusivas Evaluación de accesibilidad
ALTA	Generar modelos para impresión 3D de elementos patrimoniales como herramienta accesible.	Inclusión sensorial Modelos táctiles
ALTA	Servir como base para la planificación de intervenciones y monitoreo a largo plazo.	Conservación preventiva Planificación de mantenimiento
ALTA	Apoyar la difusión y puesta en valor del bien mediante museografía digital.	Difusión cultural Divulgación digital del patrimonio

Tabla 3. Objetivos del modelo HBIM. Fuente: Elaboración propia adaptada de Marquiño del Pezo Manya (2021).

3.5.2. Modelado HBIM y organización de la base de datos

El modelado HBIM constituye una de las fases centrales del presente trabajo, ya que permite materializar digitalmente la información obtenida durante las fases de levantamiento y diagnóstico, estructurándola en un entorno paramétrico que será utilizado como base para la gestión, conservación, accesibilidad y difusión del bien patrimonial. El objetivo de esta fase es crear un modelo geométrico y semántico de la Capilla de San Francisco de Borja, que represente con fidelidad su configuración arquitectónica y que integre datos históricos, técnicos y patológicos de forma jerarquizada y consultable.

a) Proceso de modelado paramétrico

El proceso de modelado se realizó en entorno Autodesk Revit, partiendo de la nube de puntos generada mediante escaneo láser 3D y fotogrametría. Esta nube fue importada, escalada y alineada en el espacio de trabajo como base de referencia para el trazado de geometrías. El modelado se llevó a cabo siguiendo una lógica estratigráfica, priorizando el respeto a la lectura arquitectónica y constructiva del bien. Se procedió de forma progresiva:

- Estructura general: columnas, muros, bóvedas, arcos, cúpula.
- Elementos ornamentales: cornisas, capiteles, molduras, retablos.
- Componentes litúrgicos: altar, rejas, hornacinas.

La siguiente imagen Figura 14 ilustra de forma secuencial el desarrollo del modelo paramétrico de la Capilla de San Francisco de Borja, desde las fases iniciales hasta su configuración final. El proceso comenzó con la construcción de los elementos estructurales principales (como columnas y muros) y avanzó progresivamente hacia componentes más complejos como el altar central, los arcos y las cubiertas. Posteriormente, se modelaron las pechinas y el tambor, para finalizar con la cúpula, sus detalles y elementos decorativos. Esta metodología escalonada no solo garantizó una correcta interpretación de la lógica constructiva del conjunto, sino que también permitió alcanzar un alto nivel de precisión y realismo, fundamental para los objetivos de documentación, conservación y visualización inmersiva. La estructura final integra todos los elementos modelados, respetando los criterios de fidelidad geométrica definidos por el LOD 400-500 y adaptando cada componente a los estándares del HBIM para patrimonio.

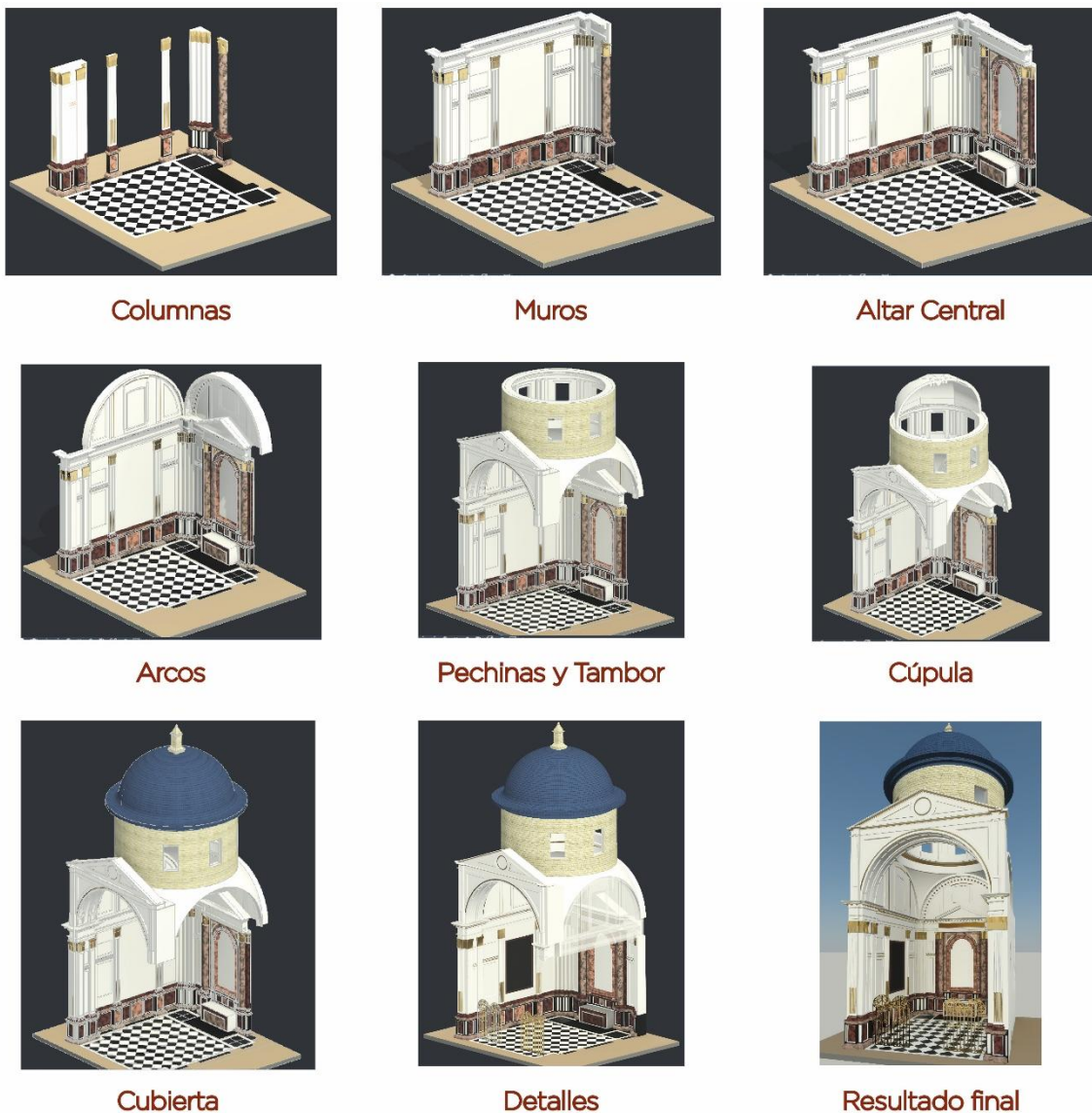


Figura 14. Paso a paso de elementos del modelado Fuente: elaboración propia



Dado que muchos de los elementos presentaban formas irregulares o no estaban disponibles en las bibliotecas estándar de Revit, fue necesario crear familias personalizadas adaptadas a la morfología y materiales del patrimonio. Se aplicaron técnicas de modelado in situ y herramientas de masa para lograr la fidelidad geométrica deseada, conforme a experiencias metodológicas como las de Escudero (2021) y Marquinho del Pezo (2023).

El nivel de detalle geométrico alcanzado fue el equivalente a un LOD 400, permitiendo una representación precisa del volumen y proporciones, para lograr un buen nivel de detalle y fidelidad al realizar las experiencias inmersivas en realidad virtual.

b) Organización semántica del modelo

Además del modelado geométrico, se estructuró una base de datos integrada dentro del modelo HBIM, permitiendo enriquecer cada elemento con información relevante en diferentes niveles:

- Datos geométricos: dimensiones, volumen, ubicación.
- Datos históricos: fase constructiva, época, transformaciones.
- Datos materiales: tipo, técnicas constructivas, acabados.
- Datos de conservación: estado actual, lesiones detectadas, intervenciones previas.
- Datos de accesibilidad: restricciones físicas, necesidades de adaptación.

Estos datos fueron introducidos como parámetros personalizados (shared parameters) y organizados mediante tablas de planificación (schedules), lo que permitió la extracción automática de informes y la generación de fichas para cada componente, como han hecho Isabel Jordán (2022) y García-Valdecabres et al. (2023) en sus respectivas investigaciones.

c) Vinculación documental y trazabilidad

Una característica clave del modelo es su capacidad para actuar como repositorio de información vinculada. A cada elemento o categoría del modelo se le asignaron hipervínculos o referencias a:

- Documentos gráficos (planos históricos, croquis).
- Fotografías de detalle o comparación temporal.
- Archivos PDF con informes técnicos.
- Textos descriptivos con datos de archivo.

Esta estructura permite garantizar la trazabilidad de la información, facilitando su consulta por diferentes perfiles de usuarios (investigadores, restauradores, técnicos), y sentando las



bases para su integración en futuras plataformas de gestión patrimonial o visualización pública.

d) Interoperabilidad y exportación

Con el fin de asegurar la interoperabilidad del modelo HBIM, se realizaron exportaciones en formatos abiertos como IFC 2x3 y COBie, compatibles con plataformas GIS y otros entornos BIM. Además, se generaron archivos en formato OBJ/FBX/ para su futura integración en motores de visualización inmersiva (VR/AR), siguiendo un flujo de trabajo que parte del modelo paramétrico y culmina en entornos accesibles y navegables.

3.6. Fase 4: Desarrollo del gemelo digital y experiencias inmersivas

En esta fase del proyecto se aborda la transición del modelo HBIM hacia su integración en entornos inmersivos, con el objetivo de construir un gemelo digital interactivo y accesible de la Capilla de San Francisco de Borja. Esta estrategia responde al objetivo de ampliar las formas de difusión del patrimonio mediante tecnologías digitales, optimizando la experiencia de usuario y promoviendo la inclusión y el conocimiento cultural.

Integración del modelo HBIM en entorno inmersivo

El modelo HBIM de la capilla, desarrollado en Autodesk Revit, se exporta en formatos compatibles con motores gráficos (como Datasmith o glTF) para ser incorporado al entorno de desarrollo Unreal Engine 5. Esta plataforma permite no solo el renderizado realista del espacio, sino también la implementación de interacciones, narrativas inmersivas y funcionalidades de accesibilidad.

El uso de Unreal Engine se fundamenta en su capacidad para representar con gran fidelidad las texturas, la iluminación y el comportamiento físico del entorno, y en su compatibilidad con dispositivos de visualización como gafas de realidad virtual (VR) y pantallas táctiles interactivas. Esta integración forma parte del flujo de trabajo HBIM-to-VR ampliamente documentado en la literatura reciente (Sanfilippo et al., 2023).

Incorporación de contenidos culturales y narrativos

Una de las características clave de este gemelo digital es la incorporación de contenidos históricos y artísticos directamente relacionados con la Capilla. Se han identificado e incluido elementos significativos como:



- Óleos de Francisco de Goya (1788), ubicados a ambos lados de la capilla, que representan momentos clave de la vida de San Francisco de Borja: su renuncia al mundo para ingresar en la Compañía de Jesús, y su acompañamiento a un moribundo impenitente protegido por la sangre de Cristo.
- Estucos alegóricos en las pechinas de la cúpula, representando las virtudes de la Templanza, la Fortaleza, la Corrección y la Justicia recta.
- Pintura central de Mariano Salvador Maella (1787) que muestra a San Francisco ante el cadáver de la emperatriz Isabel, momento de revelación espiritual del santo.
- Elementos escultóricos y simbólicos sobre el altar, incluyendo el escudo de la familia Borja y estatuas de la Oración y la Penitencia.

Estos contenidos han sido integrados en el entorno inmersivo como puntos de interacción, permitiendo al usuario acceder a información contextual mediante interfaces gráficas, narración en off o elementos visuales superpuestos.

Experiencia inmersiva y accesibilidad

La experiencia está diseñada para ser accesible mediante tecnologías de realidad virtual, pero también se prevé su adaptación para sistemas interactivos táctiles o aplicaciones web, ampliando así su accesibilidad digital. El enfoque de accesibilidad se extiende a incluir modelos táctiles impresos en 3D y narrativas adaptadas para usuarios con discapacidad visual o auditiva.

La integración de estos elementos responde al principio de difusión cultural inclusiva, como recomiendan estudios recientes sobre el papel de la RV en la preservación del patrimonio (Chen, 2024). Se ha demostrado que experiencias inmersivas bien diseñadas mejoran la comprensión, el interés y la conexión emocional del público con los bienes patrimoniales, por tanto, el gemelo digital no se concibe solo como un recurso técnico para la conservación, sino como un entorno educativo, cultural y participativo que redefine la relación entre público, tecnología y patrimonio.

3.7. Fase 5: Diseño de estrategias de accesibilidad e inclusión

Esta fase tiene como objetivo implementar soluciones inclusivas que permitan a personas con diversas discapacidades acceder y disfrutar del patrimonio cultural representado en el gemelo digital de la Capilla de San Francisco de Borja. Se presentan a continuación cinco estrategias clave, respaldadas por estudios y prácticas actuales:

3.7.1. Modelos táctiles impresos en 3D con descripciones en Braille

Se desarrollarán réplicas táctiles de elementos arquitectónicos y artísticos significativos de la capilla, como esculturas y detalles ornamentales, utilizando impresión 3D. Estas réplicas incluirán etiquetas en Braille para proporcionar información contextual. Esta práctica ha demostrado ser efectiva en instituciones como el Museo del Prado, que ha implementado exposiciones táctiles para personas con discapacidad visual. Figura 15 (Montusiewicz, (2022))



Figura 15. Imagen del programa de accesibilidad táctil en el Museo del Prado. Fuente: Museo Nacional del Prado (s. f.). Consulta: 29/04/2025.

3.7.2. Mapas hápticos de localización espacial

Se diseñarán mapas táctiles que representen la disposición espacial de la capilla, permitiendo a los usuarios con discapacidad visual orientarse y planificar su recorrido. Estos mapas utilizarán texturas y relieves para diferenciar áreas y elementos, siguiendo las recomendaciones de diseño de mapas táctiles para personas con discapacidad visual. (Montusiewicz, (2022)



Figura 16. Mapa táctil generado mediante impresión 3D para personas con discapacidad visual. Fuente: Impresoras3D.com (s. f.). Consulta: 29/04/2025.

3.7.3. Paneles multisensoriales

Se instalarán estaciones multisensoriales que combinan estímulos táctiles, sonoros y olfativos relacionados con la capilla. Estas estaciones permitirán a los visitantes experimentar aspectos del patrimonio de manera inmersiva, beneficiando especialmente a personas con discapacidades sensoriales múltiples. La implementación de experiencias multisensoriales ha sido reconocida por su efectividad en la mejora de la accesibilidad en entornos culturales. (Levent, (2014)

3.7.4. Uso de colores accesibles y contraste adaptado

Se aplicarán esquemas de color y contrastes que cumplan con las Directrices de Accesibilidad al Contenido Web (WCAG), asegurando que la información visual sea perceptible para personas con baja visión o daltonismo. Esto incluye la selección cuidadosa de combinaciones de colores y la implementación de herramientas que permitan ajustar el contraste según las necesidades del usuario. (Levent, (2014)

Estas estrategias serán aplicadas en el desarrollo del entorno digital e inmersivo de la Capilla de San Francisco de Borja, integrando criterios técnicos, pedagógicos y culturales para asegurar una experiencia patrimonial accesible, participativa y multisensorial, en línea con un enfoque contemporáneo de gestión patrimonial inclusiva.



4. Caso de estudio: La Capilla de San Francisco de Borja

Tras el desarrollo del marco teórico y la definición de la metodología de trabajo, este capítulo presenta la aplicación práctica de la propuesta en un caso de estudio concreto: la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en el crucero de la Catedral de Valencia. Esta elección, justificada previamente en el apartado metodológico, responde a su alto valor histórico, artístico y simbólico, así como a su idoneidad para experimentar con herramientas digitales avanzadas como el modelado HBIM, los gemelos digitales y las estrategias de accesibilidad patrimonial.

El capítulo se estructura en distintos apartados que permiten conocer, desde una perspectiva técnico-patrimonial, la historia, la evolución arquitectónica y las características constructivas de la capilla. Asimismo, se detalla el proceso de modelado digital, la implementación del protocolo BEP, y se presentan los resultados obtenidos en términos de documentación, visualización inmersiva y diseño inclusivo.

Este caso de estudio no solo funciona como una validación metodológica, sino también como una propuesta de gestión patrimonial digital replicable para otros bienes culturales de valor equivalente, reforzando la aplicabilidad del enfoque desarrollado en este trabajo.

4.1. Historia y contexto arquitectónico

La Catedral de Valencia: evolución arquitectónica y superposición de estilos

La Catedral de Valencia Figura 17, conocida popularmente como La Seu, constituye uno de los conjuntos arquitectónicos más emblemáticos del patrimonio urbano valenciano. Su construcción comenzó en 1262 sobre la antigua mezquita aljama de Balansiya, inmediatamente después de la conquista cristiana de la ciudad por Jaime I en 1238. Desde sus orígenes, la catedral se ha caracterizado por su condición estratigráfica y poliestilística, resultado de siglos de adiciones, reformas y reconstrucciones. En ella conviven elementos románicos, góticos, renacentistas, barrocos y neoclásicos, lo que la convierte en un palimpsesto arquitectónico de valor excepcional (Cortés, 2014, pp. 21–25).



Figura 17. localización y entorno actual de la catedral de valencia. Fuente: Google Earth 2020. (s. f.). Consulta: 29/04/2025.

El proyecto neoclásico del siglo XVIII

Uno de los episodios más significativos en la historia constructiva de la catedral fue la reforma neoclásica impulsada entre 1769 y 1831, que supuso una intervención profunda en su concepción espacial y simbólica. El cabildo catedralicio, influido por los principios del academicismo ilustrado, encargó una renovación integral del interior del templo con el objetivo de uniformar sus estilos, corregir sus irregularidades espaciales y dignificar su imagen monumental. Esta reforma fue proyectada por el arquitecto Antonio Gilabert, quien integró elementos clasicistas con la estructura gótica existente, asistido por Lorenzo Martínez en la dirección de las obras (Cortés, 2014, pp. 123–135).

Los motivos que impulsaron esta transformación fueron múltiples:

- El deterioro estructural de cubiertas, bóvedas y muros debido al paso del tiempo y la superposición de fases constructivas previas.

- La heterogeneidad estilística percibida como una pérdida de unidad estética.
- El cambio de paradigma estético, que consideraba el gótico como “rudo” frente a la “pureza” de las formas clásicas (Cortés, 2014, p. 119).
- La disponibilidad económica del cabildo, que permitió emprender un proyecto de gran envergadura en el contexto de la Ilustración valenciana.
- Esta intervención, sin embargo, generó tensiones que aún se reflejan en el debate sobre la autenticidad, la conservación y la reinterpretación del patrimonio arquitectónico.

La Capilla de San Francisco de Borja: síntesis de memoria, arte y arquitectura

En este contexto se enmarca la Capilla de San Francisco de Borja, situada en el lado de la epístola del transepto Figura 18, y concebida como parte del programa neoclásico de la catedral. La capilla constituye un ejemplo paradigmático de superposición arquitectónica, al integrar elementos clasicistas (pilastras, frisos, bóvedas tabicadas) sobre una estructura gótica preexistente. Este proceso fue coherente con la lógica unificadora del proyecto



Figura 18: Catedral de Valencia. (s. f.). Capilla de San Francisco de Borja – Localización en planta de la Catedral [Imagen]. <https://catedraldevalencia.es/artes/recorrido-interior-catedral/capilla-de-san-francisco-de-borja/> (Consulta: 29 de abril de 2025)

ilustrado, que buscaba la armonización visual del conjunto catedralicio sin eliminar del todo las trazas medievales (Cortés, 2014, pp. 144–148).

La capilla destaca también por su valor artístico, al albergar tres óleos originales: dos de Francisco de Goya, ambos fechados en 1788, y uno de Mariano Salvador Maella, fechado en 1787. Estas obras retratan episodios clave en la vida de San Francisco de Borja y fueron concebidas como parte del discurso iconográfico promovido por los jesuitas en el siglo XVIII. Además, el espacio incluye estucos con alegorías de virtudes cardinales, relieves litúrgicos, y un escudo heráldico de la familia Borja en el altar mayor, consolidando su dimensión simbólica y devocional.

El proceso de repristinación y la permanencia de lo clasicista

Tras la Guerra Civil Española, entre los años 1940 y 1970, la catedral fue sometida a un proceso de repristinación impulsado por sectores patrimonialistas que defendían la recuperación de su carácter gótico original. Esta operación supuso la eliminación sistemática de los añadidos neoclásicos, con el objetivo de restituir una supuesta “pureza medieval” que, sin embargo, nunca había existido en sentido estricto. Pese a estas intervenciones, la Capilla de San Francisco de Borja fue uno de los pocos espacios que logró conservar su configuración neoclásica, preservando así un fragmento valioso de la reforma del siglo XVIII y convirtiéndose en un testimonio excepcional de la tensión entre memoria y modernidad en la historia del templo (Cortés, 2014, pp. 218–220).

4.2. Características arquitectónicas y estructurales

La Capilla de San Francisco de Borja constituye un ejemplo notable de arquitectura superpuesta, en la que se combinan la solidez y verticalidad del gótico valenciano con la racionalidad geométrica y ornamental del academicismo neoclásico. Su estructura y diseño reflejan tanto las técnicas constructivas heredadas de la Edad Media como las innovaciones formales y materiales introducidas durante la reforma del siglo XVIII.

Desde el punto de vista compositivo, la capilla responde a un esquema de planta rectangular con testero plano, ubicada en el lado de la epístola del transepto de la catedral. Su ubicación estratégica refuerza su función simbólica dentro del conjunto litúrgico y la destaca visualmente como un enclave singular dentro del espacio catedralicio.

Estructura original gótica y reforma neoclásica

La base estructural de la capilla está conformada por muros portantes de fábrica de mampostería y sillarejo, reforzados por contrafuertes laterales y coronados originalmente por una bóveda de crucería simple típica del gótico valenciano. Sin embargo, durante la reforma ilustrada se decidió revestir este esqueleto medieval mediante el uso de bóvedas tabicadas,

construidas con ladrillo cerámico apantillado y mortero de cal, lo que permitió la creación de superficies continuas y más ligeras desde el punto de vista estructural.

Estas nuevas bóvedas se diseñaron en sección de cañón rebajado y se complementaron con una cúpula sobre pechinas en el tramo central, solución formal que refuerza la verticalidad del espacio y lo conecta con los ideales compositivos del clasicismo. Tal como documenta Cortés (2014) Figura 19, esta solución técnica permitió conservar la estructura gótica existente mientras se transformaba por completo la percepción espacial del interior (p. 147).

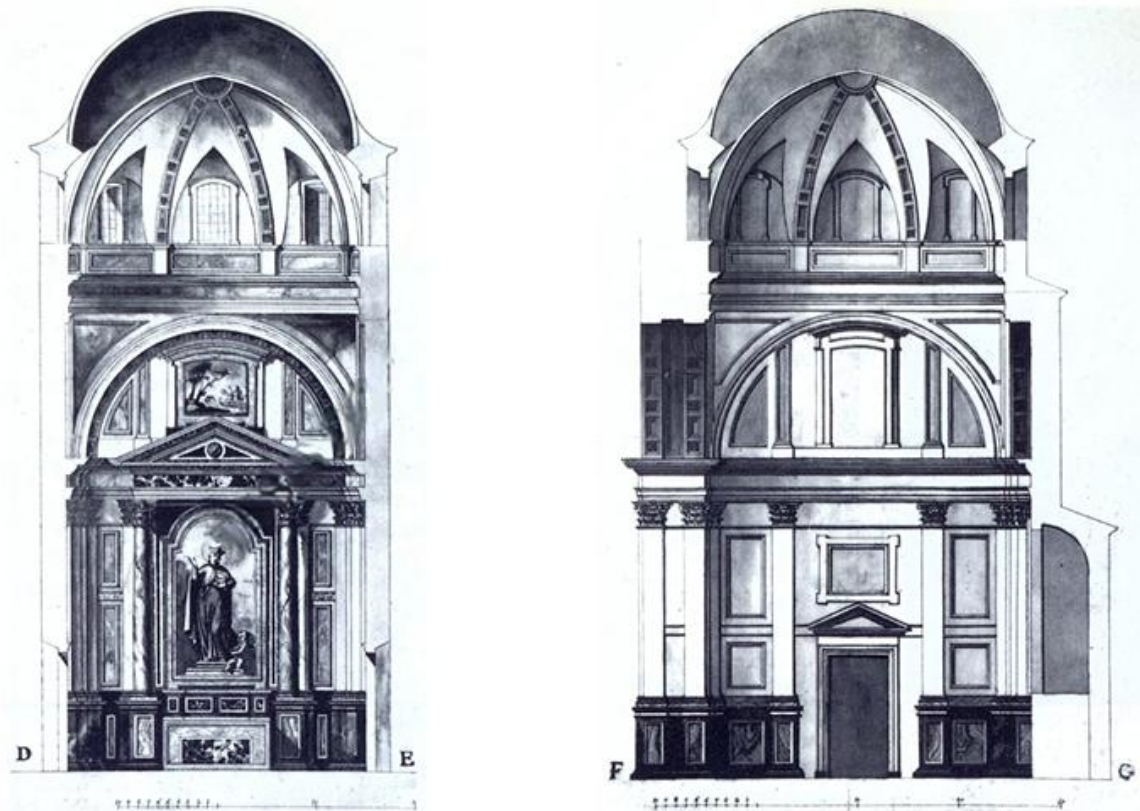


Figura 19. Alzado frontal y sección lateral del proyecto para la Capilla de San Francisco de Borja en la Catedral de Valencia. Fuente: Cortés, L. (2014).

Elementos decorativos y tratamiento de superficies

En términos ornamentales, la capilla presenta un programa decorativo coherente con los principios del academicismo neoclásico: simetría, proporción, geometría regular y el uso de órdenes clásicos. Entre los elementos destacados se incluyen:

- Pilastrado toscano y entablamentos moldurados en los paramentos laterales.
- Frisos ornamentales en estuco y molduras de yeso dorado que recorren los encuentros entre muros y bóvedas.
- Cornisas con dentículos y modillones que articulan el plano superior del muro.
- Retablo central con columnas estriadas en mármol, que enmarca la escena pictórica de Maella.



Orden menor, en el que se podría decir que es un puro estilo corintio

*Figura 21. Orden menor corintio de la catedral.
Fuente: Cortés, L. (2014).*



*Figura 20. Altar central de la capilla con la
pintura de Maella. Fuente: fotografía elab-
oración propia*

El empleo de estucos policromados y mármoles pulidos (probablemente procedentes de las canteras de Buixcarró o Monóvar, tradicionales en la zona levantina) genera un contraste elegante con el paramento gótico subyacente, enfatizando la intención de transformar el espacio en un recinto de nobleza clasicista.

Pintura, escultura y simbolismo

Uno de los elementos distintivos de la capilla es la integración de un importante conjunto pictórico y escultórico de carácter devocional y didáctico, enmarcado dentro del discurso visual jesuítico del siglo XVIII. Las pinturas al óleo de Francisco de Goya y de Mariano Salvador Maella se insertan en estructuras arquitectónicas integradas al diseño, formando un todo coherente entre imagen y espacio.



Figura 22. San Francisco de Borja despidiéndose de su familia. Francisco de Goya, 1788. Óleo sobre lienzo, 348 x 250 cm. Fuente: Fundación Goya en Aragón



Figura 24. San Francisco de Borja ante el cadáver de la emperatriz Isabel, Mariano Salvador Maella, 1787. Óleo sobre lienzo pieza del altar central. Fuente: FTA Art. (s. f.).



Figura 23. San Francisco de Borja asistiendo a un moribundo. Francisco de Goya, 1788. Óleo sobre lienzo, 348 x 250 cm. Fuente: Fundación Goya en Aragón

Las tres obras pictóricas de gran valor histórico y artístico, están vinculadas a episodios clave de la vida del santo. Los dos óleos laterales, realizados por Francisco de Goya en 1788, representan respectivamente la despedida del santo de su familia antes de ingresar en la Compañía de Jesús Figura 22, y su labor sacerdotal al asistir a un moribundo impenitente Figura 23, donde se plasma una intensa carga dramática y espiritual. En el altar central se encuentra la pintura de Mariano Salvador Maella (1787), que muestra el momento de conversión de Borja al contemplar el cadáver de la emperatriz Isabel Figura 24. Estas obras no solo refuerzan el programa iconográfico de la capilla, sino que subrayan el vínculo entre arte, espiritualidad y poder en el contexto del Neoclasicismo valenciano.

La cúpula se apoya en pechinas decoradas con estucos alegóricos, representando virtudes cardinales como la Fortaleza, la Templanza, la Justicia y la Corrección. Figura 25 Sobre el retablo, se encuentra una escena escultórica en madera y estuco pintado que representa el ingreso de San Francisco de Borja en la Compañía de Jesús, reforzando el programa iconográfico y su función litúrgica.



Figura 25. Conjunto de las 4 pechinas que sostienen la cúpula. Fotografías tomadas en visita de campo Elaboración propia

Tecnología y técnicas constructivas

La ejecución de la reforma neoclásica revela el uso de técnicas avanzadas para la época, como el modelado de superficies curvas mediante tabiques de ladrillo finamente dispuestos, el revestimiento de pilares con chapas de mármol pulido, y el empleo de moldes para la ejecución de cornisas y estucos ornamentales, lo que sugiere una planificación detallada y un alto grado de especialización de los oficios involucrados.

En conjunto, la Capilla de San Francisco de Borja puede entenderse como un ejemplo sobresaliente de intervención ilustrada sobre una estructura medieval, en la que se combinan principios de conservación estructural con criterios de renovación estética. Esta coexistencia de sistemas constructivos y lenguajes formales enriquece su valor patrimonial y justifica su elección como objeto de estudio para el desarrollo de una metodología HBIM aplicada a entornos patrimoniales complejos.

4.3. Diagnóstico del estado de conservación

El estado de conservación de la Capilla de San Francisco de Borja, aunque razonablemente estable en su conjunto, presenta diversas patologías materiales que requieren atención especializada para su preservación a largo plazo. Las observaciones realizadas in situ, junto con la documentación fotográfica, permiten establecer un diagnóstico preliminar centrado en elementos arquitectónicos, decorativos y materiales.

Entre los principales signos de deterioro se identifican:

- Roturas y pérdidas materiales en los basamentos de mármol rojo y blanco Figura 26 Figura 27, especialmente visibles en las columnas frontales y elementos de zócalo. Estas fracturas se dan típicamente en las puntas y afectan la lectura estética del conjunto y podrían facilitar el ingreso de humedad o suciedad.



Figura 26. Pérdidas materiales en las esquinas del mármol Fuente: elaboración propia



Figura 27. Pérdidas materiales en las esquinas del mármol Fuente: elaboración propia

- Fisuras estructurales y microgrietas localizadas en los apliques de yeso Figura 28 y elementos decorativos clasicistas, como cornisas y molduras, algunas de las cuales discurren a lo largo de juntas constructivas verticales. Si bien no representan un riesgo inmediato de colapso, su evolución debe ser monitoreada.



Figura 28. Fisuras y microgrietas localizadas en los apliques de yeso y elementos decorativos Fuente: elaboración propia.

- Desprendimientos y abrasiones en zonas pintadas, especialmente en el paramento inferior de los muros laterales. En algunos casos se observan restos de adhesivos u otros tratamientos mal retirados que han provocado la pérdida de estratos pictóricos y también se aprecia desgaste y desprendimiento de la pintura que imita al mármol rojo y policromías doradas en las puertas de la capilla que dan hacia estancias internas de la catedral. Figura 29



Figura 29. Desprendimientos y abrasiones en zonas enlucidas y también en la pintura que imita al mármol rojo y policromías doradas en las puertas de la capilla que dan hacia estancias internas de la catedral. Fuente: elaboración propia.

- Aparición de eflorescencias y manchas de humedad, asociadas probablemente a la porosidad del material base y a la acción combinada de la condensación interna con el clima húmedo y cálido de Valencia, caracterizado por una alta variabilidad higro-térmica. Figura 30



*Figura 30. Eflorescencias y manchas de humedad.
Fuente: elaboración propia.*

A pesar de estas patologías puntuales, el estado general de la capilla puede considerarse aceptable, especialmente si se tiene en cuenta su exposición continua a flujos turísticos intensos, las condiciones ambientales del entorno y su complejidad constructiva. No obstante, estos daños evidencian la necesidad de desarrollar un protocolo de mantenimiento preventivo apoyado en tecnologías digitales como el HBIM y el gemelo digital, herramientas que permitirían registrar, simular y predecir la evolución del deterioro de forma integrada.

En el análisis convencional de patologías en edificaciones históricas, es común recurrir a la representación bidimensional mediante alzados, secciones y vistas anotadas que permiten registrar gráficamente las superficies afectadas, a través de lo que se conoce como análisis estratigráfico visual. Sin embargo, la aplicación de metodologías digitales más avanzadas, como el Heritage Building Information Modeling (HBIM), permite enriquecer notablemente este proceso.

Siguiendo las líneas metodológicas propuestas por Angulo Fornos (2019), se propone como alternativa incorporar la información sobre patologías directamente en el entorno tridimensional del modelo, asignándola a coordenadas específicas del espacio. Esta estrategia, que puede entenderse como una extrapolación del concepto de nube de puntos, facilita la asociación de datos sobre alteraciones materiales a puntos ubicados con precisión sobre la geometría del edificio. De este modo, es posible no solo identificar visualmente las zonas afectadas, sino también cuantificar con exactitud el área deteriorada y representarla tridimensionalmente de forma automática y actualizable. (Escudero, 2021).

En el marco de este trabajo, se realizó un ensayo metodológico sobre una de las columnas interiores de la Capilla de San Francisco de Borja, seleccionada por presentar diversos daños materiales. Las observaciones revelaron fracturas localizadas en los perfiles de los elementos marmóreos decorativos, particularmente en las esquinas del basamento. A partir de esta evidencia, se procedió a realizar una segmentación constructiva del elemento afectado, la caracterización del material, y el posterior mapeo de las patologías sobre el modelo HBIM, utilizando un sistema de puntos vinculados a atributos alfanuméricos. Como podemos ver en la figura ilustrativa Figura 31 y Figura 32, el proceso de modelado, clasificación y localización tridimensional de las patologías detectadas.

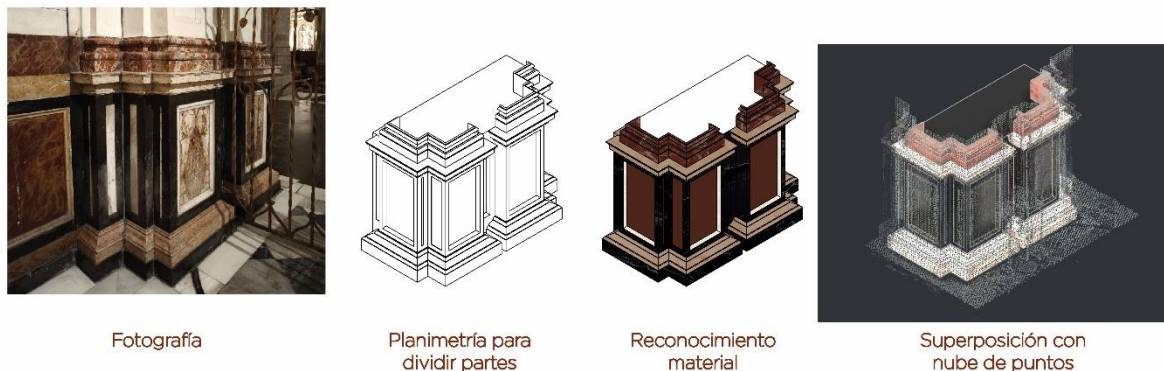


Figura 31. Reconocimiento material al basamento de la columna de entrada lateral derecha. Fuente elaboración propia

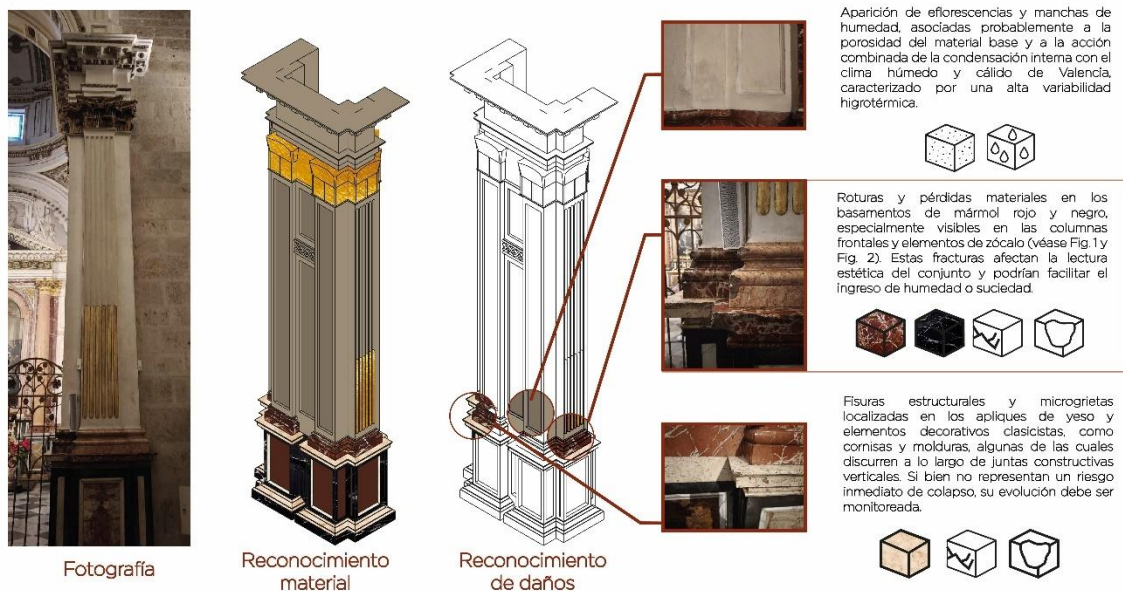


Figura 32. Reconocimiento material y de daños a la columna de entrada lateral derecha y su basamento. Fuente: elaboración propia

Propuestas de Conservación y Monitoreo

Para abordar estos problemas y asegurar la preservación de la capilla, se recomienda la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en sensores IoT. Estos sensores pueden medir parámetros clave como la humedad, temperatura y vibraciones, lo

que permitiría detectar cambios en el estado de conservación antes de que se produzcan daños mayores.

Además, la creación de un modelo HBIM (Heritage Building Information Modeling) de la capilla podría facilitar la planificación y ejecución de intervenciones de conservación, optimizando el uso de recursos y garantizando la documentación digital del patrimonio.

4.4. Aplicación de la metodología HBIM al caso de estudio

Con el objetivo de aplicar las ventajas de la metodología HBIM en la Capilla de San Francisco de Borja, se implementa un flujo de trabajo basado en las acciones y fases pensadas para poder tener un modelo óptimo para generar experiencias inmersivas y de realidad virtual, llegando a un buen nivel de detalle en el modelo para que sea lo más afín a la realidad posible.

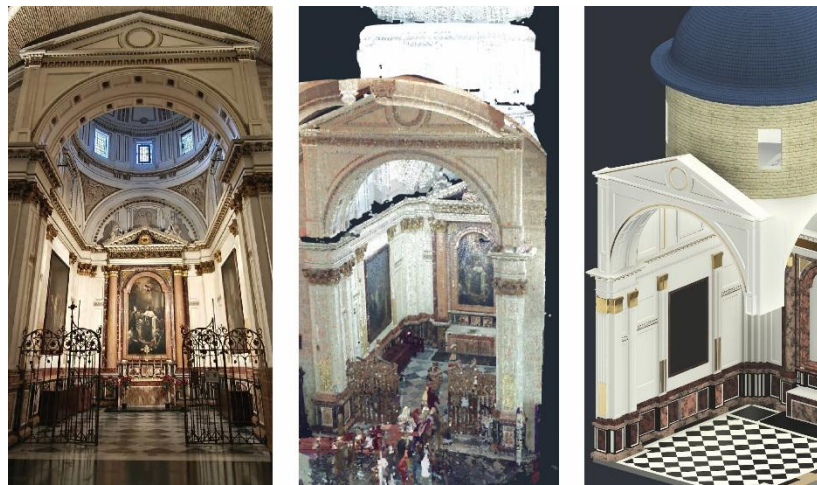


Figura 33. Fases de implementación metodología HBIM. Fuente: elaboración propia

4.4.1. Creación del archivo y plantilla de trabajo

Se inicia el proceso configurando un nuevo archivo de proyecto en Autodesk Revit 2024, a partir de una plantilla adaptada para entornos patrimoniales. Esta plantilla incluye configuraciones personalizadas de unidades, niveles de trabajo, parámetros compartidos y familias de referencia básica, optimizadas para el modelado de edificios históricos. Figura 34

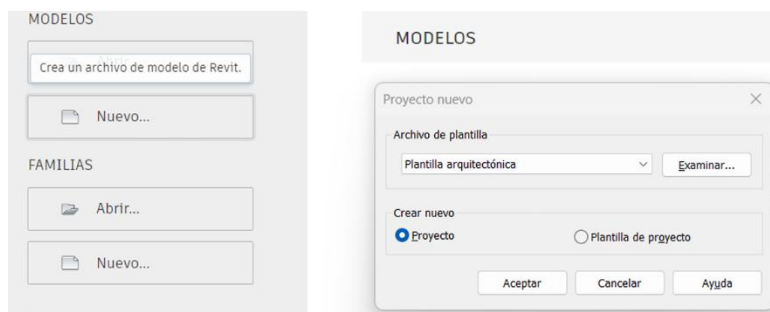


Figura 34. Creación de archivo. Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Inserción de documentos guía en el archivo

En esta etapa se incorporan como referencias visuales nubes de puntos generadas a partir de escaneo láser 3D y archivos CAD 2D Figura 35. Estos documentos permiten guiar el modelado geométrico con base en datos reales, garantizando precisión dimensional y respeto a la morfología histórica.

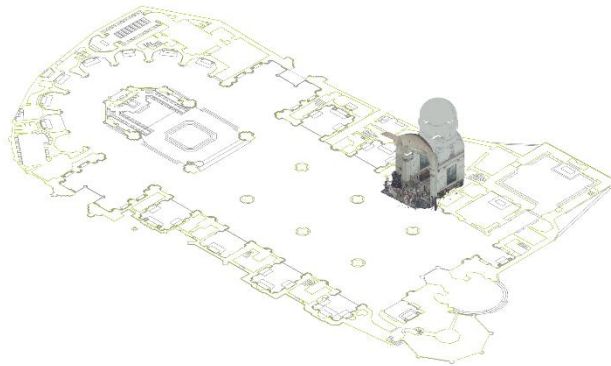


Figura 35. Ubicación y alineación de la nube de puntos sobre la planta de CAD de la catedral. Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. Modelado del pavimento

Siguiendo la metodología descrita por Bertacchi et al. (2021), se genera inicialmente una masa base del pavimento a partir de las referencias existentes, en este caso la nube de puntos Figura 36. Posteriormente, el pavimento es subdividido en partes diferenciadas para representar cambios y tipo de material, estado de conservación o funciones específicas Figura 37. El suelo de la Capilla de San Francisco de Borja, ubicada en la Catedral de Valencia, está realizado en mármol, siguiendo una composición de baldosas en damero (ajedrezado) con piezas de mármol blanco y negro, un recurso frecuente en la ornamentación neoclásica que responde a la renovación estilística llevada a cabo en el siglo XVIII. Esta disposición no solo ofrece un contraste visual elegante, sino que también refuerza la simetría y monumentalidad propias del academicismo clasicista.

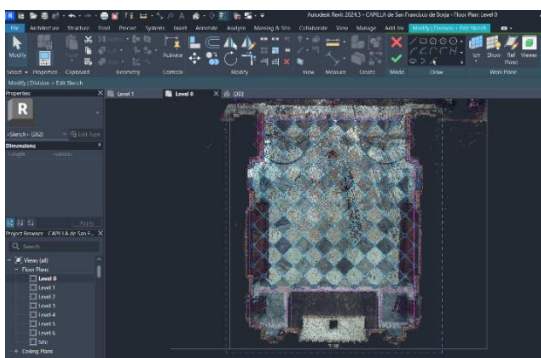


Figura 36. División del pavimento a partir de la nube de puntos. Fuente: elaboración propia.

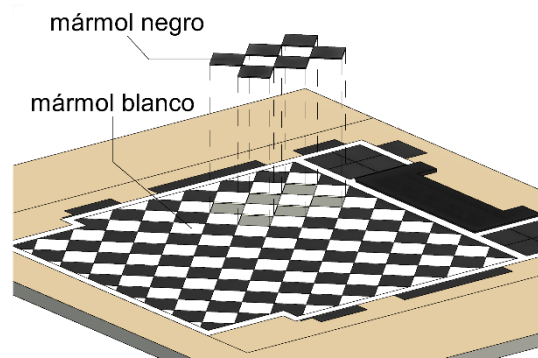


Figura 37. Pavimento dividido en cada una de sus partes con etiquetas de material. Fuente: elaboración propia.

4.4.4. Modelado de familias que conforman el edificio con su respectivo LOD y LOK

Se procede a crear familias paramétricas específicas (pilastras, columnas, retablos, cornisas), ajustadas al nivel de detalle geométrico (LOD) y al nivel de conocimiento (LOK) correspondiente. Cada elemento respeta las proporciones originales y la estratificación material detectada durante el levantamiento. Como ejemplo práctico se muestra el proceso de modelado de las pechinas que sostienen la cúpula. Dentro del software Autodesk Revit se crea la plantilla de familia para realizar el modelado de la geometría del elemento constructivo del edificio. En este caso se trabaja con un nivel de simplificación formal 5, esto quiere decir que algunas de las formas son simplificadas con respecto a las reales como los detalles escultóricos que presentan en su acabado, pero se logra llegar a una proporción muy cercana a la real gracias a tener la guía de la nube de puntos. Cuando creamos las diferentes familias, es necesario analizar la generación de las formas geométricas para determinar que método es el más eficiente en términos de tiempo y objetivos para modelar el elemento, (Escudero, 2021) en este caso se optó por generar la forma a partir de la creación de una media esfera en azul, a la cual se le realiza un proceso de sustracción por medio de figuras vacías que se muestran en naranja Figura 39, el resultado es una forma geométrica que encaja a la perfección con los arcos que apoyan estructuralmente la cúpula Figura 38.

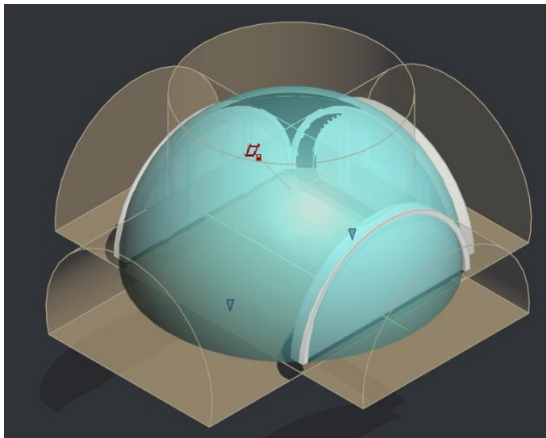


Figura 39. Proceso de modelado de pechinas. Fuente: elaboración propia



Figura 38. Resultado de modelado de pechinas. Fuente: elaboración propia

Al seguir estas acciones o procesos, obtenemos un modelado geométrico con la información dimensional y material del edificio Figura 40, el cual está dividido por familias que lo componen en su totalidad obteniendo así un gemelo digital de la capilla de San Francisco de Borja, de forma que el paso siguiente consiste en la asignación de parámetros a los elementos constructivos, es decir, relacionar la información geométrica con la información que puede estar representada por imágenes, planos, tablas, textos, etc.



Figura 40. Resultado de modelado en Revit de la capilla de San Francisco de Borja.
Fuente: elaboración propia

4.4.5. Asignación de parámetros e información a los elementos constructivos

Los objetos modelados se enriquecen mediante la asignación de parámetros personalizados: tipo de material, nomenclatura, patologías, técnicas constructivas entre otras. Esta información se vincula a los elementos para permitir su consulta, filtrado y posterior exportación hacia entornos de difusión o análisis. En nuestro caso asignamos catorce parámetros Figura 41 con el objetivo de demostrar sus diferentes utilidades. Además, es útil destacar que los objetos constructivos están vinculados con imágenes que hacen referencia al elemento real y en este caso a su patología de una manera más visible Figura 42.

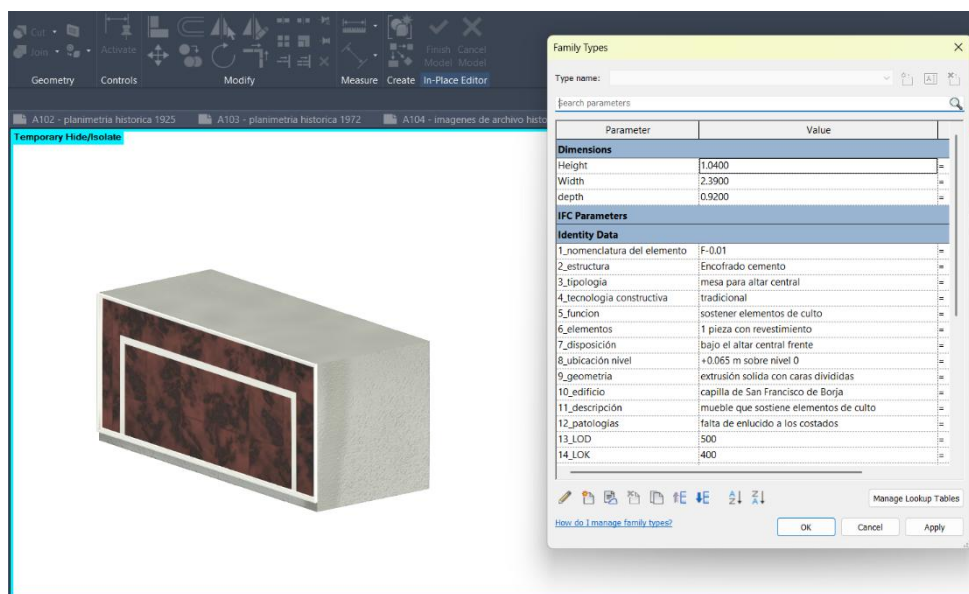


Figura 41. Mesa en concreto frente al altar central y su tabla de parámetros: Fuente: elaboración propia.

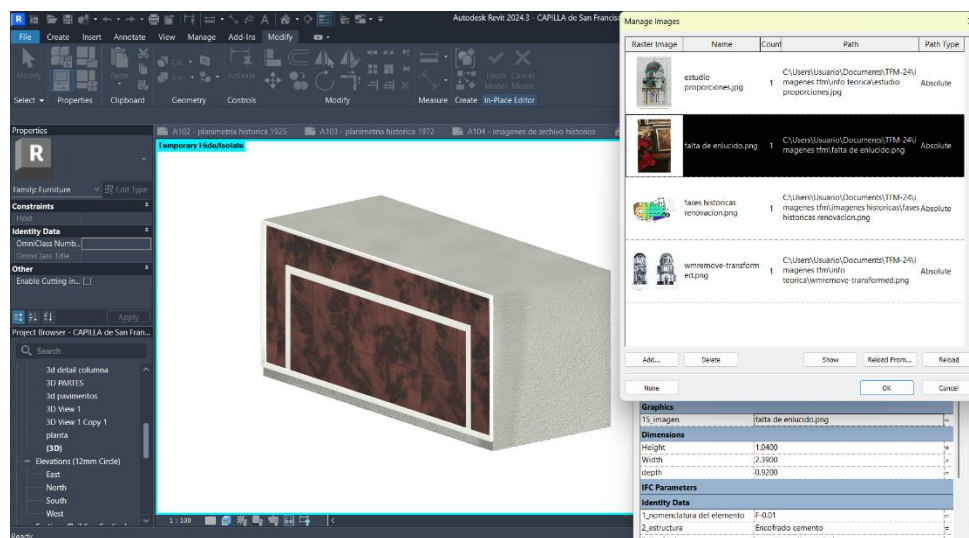


Figura 42. Mesa en concreto frente al altar central y su vinculación con imagen de su patología Fuente: elaboración propia.

4.4.6. Enlazado de documentos, cartografías históricas existentes y documentos de archivo

Se vinculan al modelo digital las cartografías históricas, documentos de archivo y registros fotográficos relevantes, siendo estas importantes en el análisis y reconocimiento para la generación del modelo e hipótesis de posibles fases histórico-constructivas y poder ver el avance del edificio en el tiempo. Las cartografías son incluidas y referenciadas con los elementos 3D a través de parámetros, con esto se busca una centralización de los datos. (Escudero, 2021)

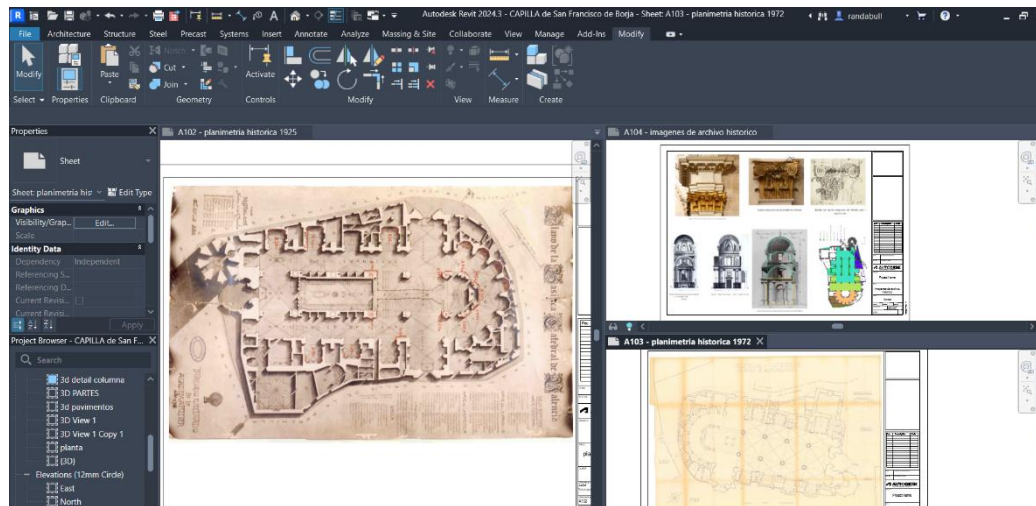


Figura 43. Incorporación de las cartografías históricas al modelo centralizado HBIM en Autodesk Revit.

Fuente: elaboración propia.

4.4.7. Integración del modelo parcial en el contexto general de la Catedral

Una vez finalizado el modelado detallado de la Capilla de San Francisco de Borja, se procedió a su integración dentro del modelo general de la Catedral de Valencia. Figura 44 Este paso resulta fundamental para ubicar espacialmente la capilla en relación con el conjunto catedralicio, permitiendo comprender su papel arquitectónico, simbólico y funcional dentro de la estructura total del templo. Asimismo, esta vinculación facilita el análisis integrado de aspectos como la evolución histórica, la conservación de elementos constructivos y la planificación de futuras intervenciones.

El modelo central de la catedral ha sido desarrollado por el Centro de Investigación en Arquitectura, Patrimonio y Gestión para el Desarrollo Sostenible (PEGASO), en el marco del proyecto de investigación “Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la creación de un protocolo de planificación turística del patrimonio cultural de un destino” orientada a la digitalización y gestión del patrimonio valenciano. Dado que ambos modelos fueron elaborados en el mismo entorno de trabajo (Autodesk Revit 2024), no fue necesario realizar una exportación en formato IFC para su interoperabilidad, lo cual favoreció una inserción directa, precisa y sin pérdida de información.

No obstante, cabe destacar que el modelo de la capilla cumple con los estándares de organización, codificación y estructuración paramétrica exigidos por las metodologías BIM, por lo que está preparado para ser exportado a otros formatos (como IFC, OBJ o FBX) en caso de ser necesario su uso en diferentes plataformas o entornos colaborativos.

Esta integración, además de mejorar la coordinación geométrica y documental, posibilita la generación de experiencias inmersivas ubicadas dentro del conjunto catedralicio, ampliando el potencial de difusión, accesibilidad e investigación del patrimonio.

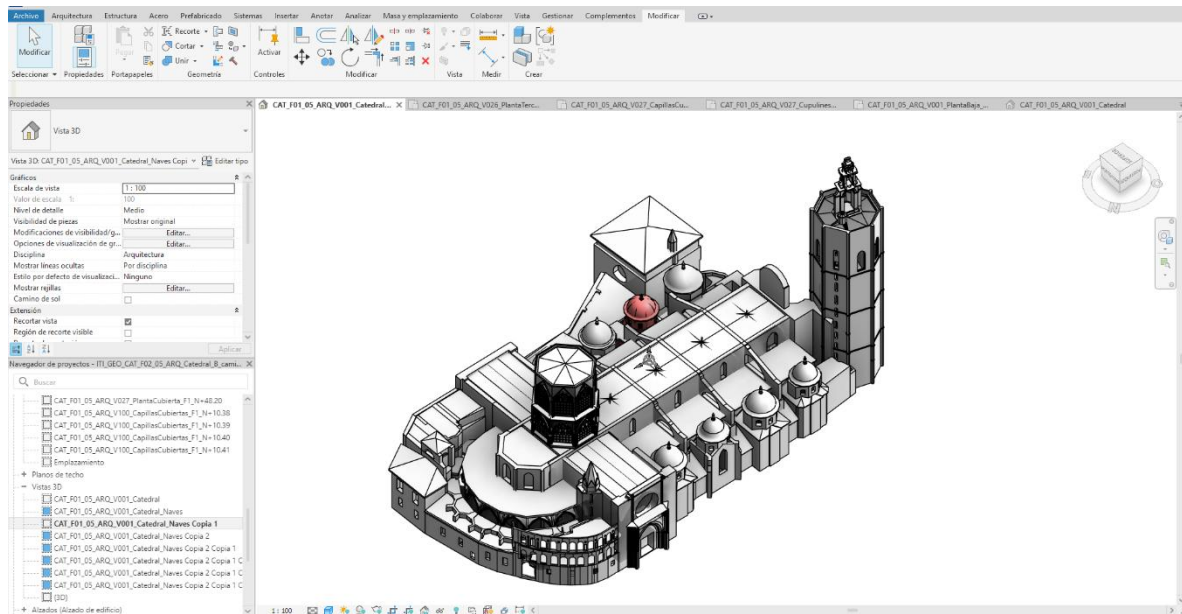


Figura 44. Enlazado de la capilla de San Francisco de Borja al modelo central de la catedral de valencia. Fuente: elaboración propia

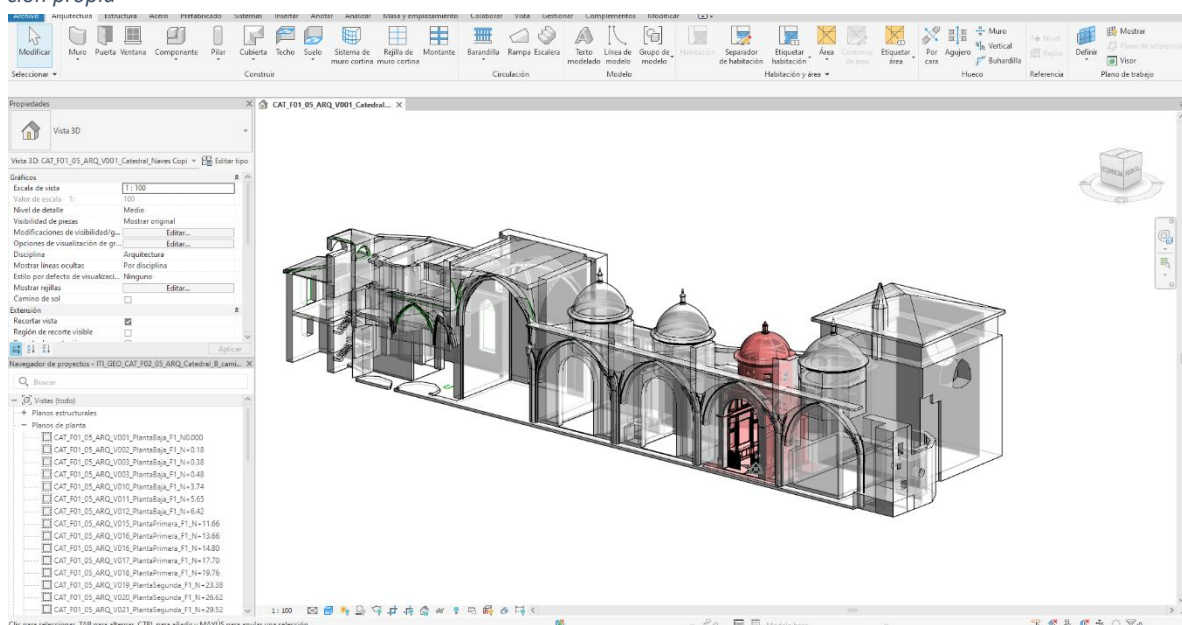


Figura 45. Vista en sección de la capilla de San Francisco de Borja unida modelo central de la catedral de valencia. Fuente: elaboración propia.

4.4.8. Exportación a software de realidad virtual

Finalmente, el modelo consolidado se exporta mediante el plugin Datasmith hacia Unreal Engine 5 Figura 46, a partir de Revit 2024 el plugin se encuentra integrado con el programa lo que hace más fácil la interoperabilidad entre los 2 softwares, (en casos de versiones anteriores de Revit es necesario descargar el plugin aparte) garantizando la transferencia de geometrías, materiales y estructuras jerárquicas. Esta exportación sienta las bases para el desarrollo de entornos inmersivos en VR/AR orientados a la difusión, la accesibilidad y la experiencia patrimonial interactiva.

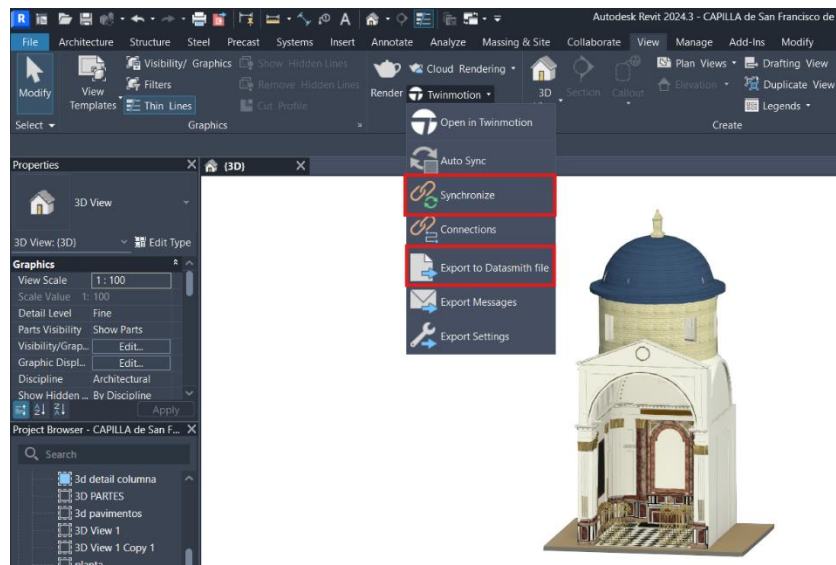


Figura 46. Exportación al software unreal engine 5 donde se realizarán las experiencias de realidad virtual. Fuente: elaboración propia

4.5. Resultados del modelado y documentación digital

El proceso de modelado HBIM de la Capilla de San Francisco de Borja ha dado como resultado la obtención de un modelo tridimensional paramétrico que integra información geométrica, material, histórica y de conservación en un entorno único y coherente. Este modelo no solo responde a criterios de representación gráfica, sino que constituye un repositorio dinámico de datos patrimoniales, en consonancia con los principios establecidos en el Plan de Ejecución BIM (BEP) desarrollado para el presente trabajo.



Entre los principales productos derivados del modelado destacan:

- **Planimetría digital:** Se han generado plantas, alzados y secciones de alta precisión a partir del modelo HBIM. Estas vistas reflejan tanto la estructura geométrica original como las modificaciones introducidas durante las distintas fases históricas, y sirven como base para futuras actuaciones de conservación o estudios arquitectónicos.
- **Fichas descriptivas de familias paramétricas:** Cada uno de los elementos arquitectónicos modelados (pilastras, bóvedas, elementos decorativos, esculturas) ha sido documentado mediante fichas técnicas que recogen su geometría, materiales, técnicas constructivas, estado de conservación y nivel de conocimiento (LOK). Esta documentación facilita la trazabilidad de la información y su uso en distintos contextos, desde la conservación preventiva hasta la difusión museográfica.
- **Asociación de datos históricos y diagnósticos:** Los componentes del modelo han sido enriquecidos con vínculos a fuentes documentales, cartografías históricas y resultados de análisis patológicos, permitiendo consultas dinámicas y multidimensionales sobre el bien patrimonial.
- **Preparación del modelo para entornos inmersivos:** El modelo HBIM ha sido optimizado para su exportación hacia motores de realidad virtual, conservando su estructura jerárquica y atributos principales, en línea con los objetivos de accesibilidad y difusión definidos en la fase metodológica.

La documentación generada constituye así un producto híbrido: a la vez representación gráfica, base de datos y plataforma de gestión, capaz de adaptarse a múltiples usos futuros en el campo de la conservación, la investigación, la educación patrimonial y la accesibilidad cultural.

4.6. Diseño y resultados de experiencias RA/RV

La fase de desarrollo de experiencias de Realidad Aumentada (RA) y Realidad Virtual (RV) constituye uno de los ejes centrales del presente trabajo, ya que permite materializar los beneficios del modelo HBIM más allá de la documentación técnica, abriendo nuevas posibilidades de interacción con el patrimonio arquitectónico. En este caso, se ha diseñado una experiencia inmersiva en el entorno Unreal Engine 5 basada en el modelo paramétrico de la Capilla de San Francisco de Borja, con el objetivo de facilitar una exploración educativa, accesible y culturalmente enriquecedora del bien patrimonial.

Ahora se mostraran los pasos a seguir después de tener el modelo HBIM esto conecta los resultados del modelo con la experiencia VR y permite que sea mas fácil replicar el estudio en otros contextos patrimoniales

4.6.1 link con el modelo de Revit

Como se ha comentado al final del apartado Aplicación de la metodología HBIM al caso de estudio, la versión utilizada de Revit 2024, ya tiene integrado el plugin datasmith lo que permite que ambos modelos estén conectados y que cualquier cambio se vea reflejado en el motor unreal engine 5 de ser necesario modificar algún aspecto del modelo

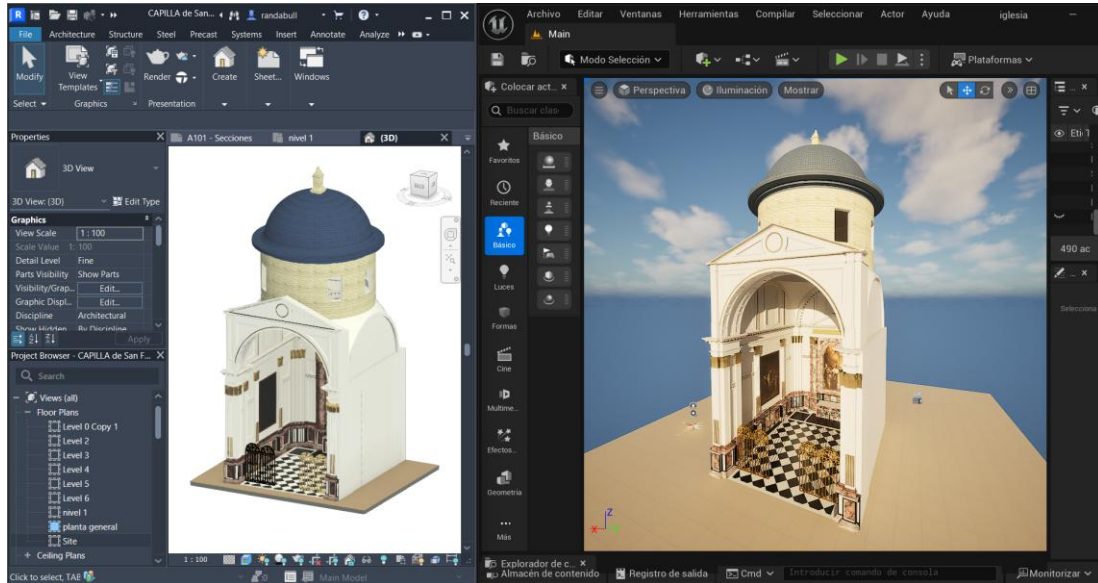


Figura 47. Interoperabilidad entre Revit 2024 y unreal engine 5 Fuente: elaboración propia

4.6.2 ajuste de colisiones y materiales

Una vez importado el modelo desde Autodesk Revit al entorno de Unreal Engine 5, es fundamental realizar el ajuste de colisiones para garantizar una experiencia inmersiva coherente y funcional. Este proceso permite evitar que el usuario atraviese elementos arquitectónicos durante la navegación virtual, preservando así la lógica espacial del recinto patrimonial.

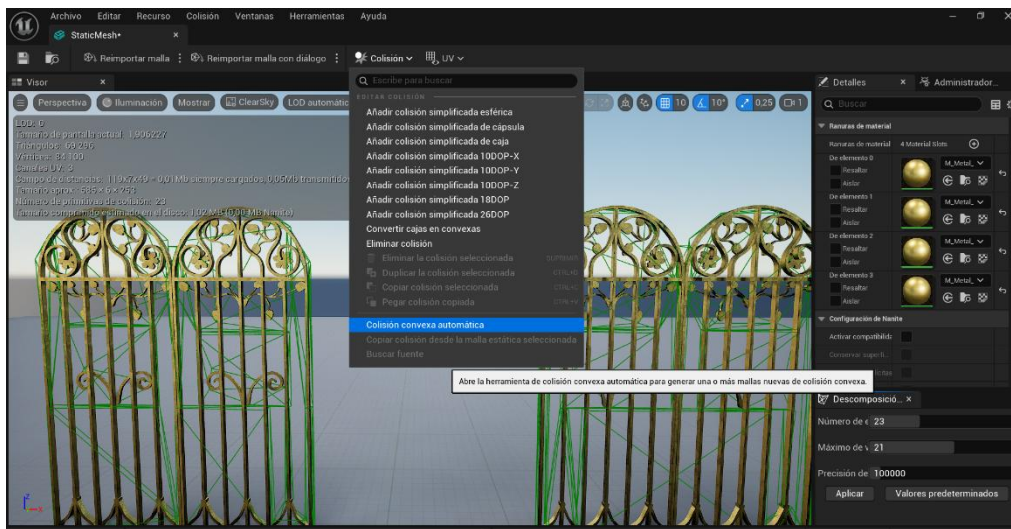


Figura 48. Colisiones en unreal engine. Fuente: elaboración propia

Para ello, se seleccionan los elementos del modelo dentro del motor gráfico y se accede a la pestaña de configuración de colisiones. Se optó por emplear la opción de colisión convexa automática, que genera una malla invisible alrededor del objeto seleccionando sus contornos externos. Esta solución ofrece un equilibrio adecuado entre fidelidad geométrica y eficiencia de rendimiento, al evitar intersecciones no deseadas sin sobrecargar el procesamiento del entorno.

Se ha aplicado este procedimiento principalmente a los elementos estructurales y perimetrales —como muros, columnas, rejas y pavimentos—, cuya interacción con el usuario resulta crítica en términos de orientación y desplazamiento dentro de la escena virtual. En el caso específico de las rejas doradas ubicadas en el acceso a la capilla, el ajuste de colisión fue refinado para impedir el paso del personaje sin comprometer la percepción visual del detalle ornamental (Figura 48).

Asimismo, se abordó la optimización de materiales. Aunque los materiales importados desde Revit conservan una apariencia básica, Unreal Engine 5 permite un tratamiento visual más avanzado. Por esta razón, se procedió a la sustitución y edición de varios de ellos, aplicando texturas de mayor resolución, mapas de normal y propiedades físicas (reflectancia, rugosidad) con el fin de incrementar el realismo del entorno. Este ajuste mejora significativamente la calidad visual del modelo, reforzando la dimensión inmersiva y la percepción sensorial del espacio.

4.6.3 diseño de interfaz de usuario mediante programación

La experiencia virtual comienza con la programación de una interfaz de usuario personalizada, que actúa como menú principal y punto de entrada a la navegación. Esta interfaz fue desarrollada mediante Blueprints de Unreal Engine, e incluye opciones de recorrido libre, activación de puntos informativos, y ajustes de accesibilidad como texto de alto contraste y narración sonora. Su implementación supuso un desafío técnico, ya que requiere conocimientos específicos de programación visual y una cuidadosa estructuración del flujo de interacción, tal como se reconoce en (Sanfilippo et al., 2023) y Fiorenza et al. (2024) sobre entornos inmersivos adaptados a patrimonio.

4.6.4 adaptación de story telling para la experiencia ar/vr

Dentro del entorno inmersivo, se identificaron e integraron como elementos interactivos las tres pinturas principales de la capilla:

- San Francisco de Borja despidiéndose de su familia (Goya, 1788)
- San Francisco de Borja asistiendo a un moribundo (Goya, 1788)
- San Francisco de Borja ante el cadáver de la emperatriz Isabel (Maella, 1787)

Estas obras actúan como nodos informativos enriquecidos con datos históricos, anécdotas y recursos visuales adicionales. Para ello, se llevó a cabo una investigación documental con el fin de recopilar información precisa y relevante sobre los autores, su trayectoria y el contexto iconográfico. Un ejemplo destacado es la inclusión del dato aportado por Cortés (2014) sobre la existencia del “cuarto del chocolate” anexo a la capilla, espacio utilizado en

su momento como lugar de descanso y sociabilidad, y que tomado como un dato curioso en la experiencia como parte del recorrido.

La aplicación de storytelling dentro de la experiencia RA/RV se diseñó mediante narrativas breves activadas por proximidad, que guían al usuario a través de momentos clave de la vida de San Francisco de Borja. Este enfoque responde a los principios del aprendizaje significativo en entornos inmersivos (Liu, Zhang, & Wang, 2020), y refuerza el carácter divulgativo del proyecto buscando un entorno interactivo.



Figura 49. Prototipo de entorno VR en unreal engine Fuente: elaboración propia.

4.6.5 pruebas y resultados

Aunque el entorno inmersivo desarrollado en Unreal Engine 5 presenta un alto grado de completitud en términos de diseño, funcionalidad y fidelidad visual Figura 50, no fue posible llevar a cabo una fase formal de pruebas con usuarios debido a limitaciones de tiempo y recursos en el marco del presente Trabajo de Fin de Máster. No obstante, se propone esta etapa como una línea futura prioritaria, con el objetivo de validar la experiencia desde una perspectiva técnica, accesible y educativa.

En esta futura fase de evaluación, se recomienda implementar una doble estrategia de pruebas: por un lado, revisiones internas centradas en la estabilidad del entorno, el comportamiento de colisiones, la calidad visual de los materiales y la eficiencia del sistema en diferentes configuraciones de hardware; y por otro, test de usabilidad con usuarios reales,

preferentemente públicos diversos (con y sin experiencia en VR), para valorar aspectos como la navegación, la claridad de los contenidos interactivos y la accesibilidad de la interfaz.

Especial atención deberá prestarse a la evaluación de recursos de accesibilidad integrados en el entorno, tales como modelos simplificados, esquemas de color adaptados, narración sonora y puntos de interacción informativos. Asimismo, resultaría pertinente incorporar herramientas de seguimiento de experiencia del usuario (UX) y protocolos de evaluación con base en estándares de accesibilidad digital (WCAG, Design for All, etc.).



Figura 50. Vista del personaje dentro del entorno virtual de la capilla. Fuente elaboración propia

Estas pruebas permitirían detectar oportunidades de mejora, ajustar dinámicas interactivas y optimizar la experiencia inmersiva con base en la retroalimentación de los propios usuarios. Además, constituirían un paso clave para consolidar el modelo como herramienta replicable en museografía digital, educación patrimonial o dispositivos de accesibilidad para personas con discapacidad.

A pesar de no haber podido implementar esta fase experimental en el presente estudio, su inclusión como recomendación metodológica busca dejar sentadas las bases para futuras validaciones del entorno desarrollado, alineadas con los principios de accesibilidad, inclusión y experiencia significativa del usuario que guían el enfoque general del proyecto.

4.7. Prototipos inclusivos: modelos táctiles y museografía adaptada

Con el fin de fortalecer la accesibilidad y la inclusión en la experiencia patrimonial de la Capilla de San Francisco de Borja, se ha desarrollado un conjunto de prototipos físicos impresos en 3D basados en el modelo HBIM previamente generado. Estos elementos permiten una exploración táctil del patrimonio arquitectónico, facilitando el acceso a personas con discapacidad visual, cognitiva o dificultades de comprensión espacial.

La impresión 3D ofrece múltiples ventajas en el contexto de la accesibilidad museográfica, como la reproducción precisa de detalles arquitectónicos, la posibilidad de escalado para una mejor manipulación y la incorporación de elementos sensoriales adicionales como inscripciones en braille o texturas diferenciadas (Coughlan, Ritsos, Holloway, Marriott, & Smith, 2023).

Los prototipos realizados incluyen:

- Columnas y pilastras modeladas a escala, que permiten a los usuarios identificar los principales elementos estructurales de la capilla mediante el tacto. Figura 51



Figura 51. Prototipo columna impresión 3D Fuente: elaboración propia.

- Altar central de la capilla, adaptado con volúmenes simplificados para facilitar su interpretación háptica, pero con un buen nivel de detalle. Figura 53 En su reverso se integra texto en braille Figura 52, que puede tener diferentes funciones tales como informar acerca de autores, datos interesantes del elemento impreso y simbología de los distintos elementos arquitectónicos.



Figura 53. Prototipo altar central impresión 3D
Fuente: elaboración propia



Figura 52. Prototipo altar central impresión 3D con letras en braille al reverso Fuente: elaboración propia

- Planos hápticos de planta, diseñados para ofrecer una visión global y espacial del recinto, representando accesos, muros, altares y zonas de interés patrimonial con códigos táctiles diferenciados. Figura 54



Figura 54. Prototipo de plano háptico para personas con discapacidad visual Fuente: elaboración propia.



La elaboración de estos recursos responde a estrategias recientes de museografía inclusiva, donde se promueve la participación de todos los públicos mediante experiencias multisensoriales. Tal como señalan (Coughlan et al., 2023), el acceso táctil al patrimonio no solo facilita la inclusión de personas con discapacidad visual, sino que enriquece la experiencia de públicos generales, promoviendo una interacción más activa y significativa con los bienes culturales.

La integración de estos prototipos en el proyecto busca crear un modelo replicable de buenas prácticas para otros espacios patrimoniales, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 10 sobre reducción de desigualdades y el ODS 11 sobre ciudades sostenibles e inclusivas.

5. Análisis y Discusión

La quinta sección del presente trabajo tiene como objetivo reflexionar críticamente sobre los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología propuesta, valorando tanto sus logros como sus limitaciones, y estableciendo un diálogo entre los datos empíricos, los marcos teóricos de referencia y las tendencias actuales en la gestión patrimonial digital.

A través de este capítulo se busca no solo evaluar la eficacia de la metodología HBIM-to-VR aplicada a la Capilla de San Francisco de Borja, sino también identificar los beneficios y desafíos surgidos en cada fase del proceso, considerando aspectos técnicos, operativos, metodológicos y sociales. La evaluación de los resultados se realizará en función de los objetivos específicos planteados al inicio de la investigación, contrastándolos con las evidencias documentadas en las fases anteriores.

Asimismo, se abordará una reflexión crítica sobre el potencial transformador que tiene la integración de estrategias de accesibilidad, inclusión y experiencias inmersivas en la gestión del patrimonio arquitectónico, alineándolo con los principios de sostenibilidad e innovación impulsados por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Este análisis permitirá extraer lecciones aprendidas y proponer recomendaciones prácticas que sirvan de base para futuras aplicaciones de modelos HBIM en contextos patrimoniales complejos, consolidando la contribución del presente estudio a la evolución de las metodologías digitales de conservación y difusión cultural.



5.1. Evaluación de los resultados obtenidos

La evaluación de los resultados obtenidos en el presente estudio se articula en torno al grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y al análisis de las aportaciones metodológicas derivadas de la aplicación práctica en la Capilla de San Francisco de Borja.

En primer lugar, cabe señalar que la implementación de la metodología HBIM ha permitido la creación de un modelo digital estructurado que integra información geométrica, histórica y material de la capilla. La combinación de técnicas de levantamiento digital (escaneo láser 3D y fotogrametría) con la sistematización documental ha dado como resultado un modelo que no solo representa con fidelidad las condiciones arquitectónicas actuales, sino que también incorpora datos históricos y patologías materiales. Esta integración, siguiendo planteamientos similares a los expuestos por Escudero (2021) y Bertacchi (2022), confirma la capacidad del HBIM para servir como repositorio de conocimiento y herramienta de gestión patrimonial.

Adicionalmente, se elaboró un Plan de Ejecución BIM (BEP) específico para entornos patrimoniales, que estructuró las fases de modelado, documentación, gestión de información y posterior exportación a entornos inmersivos. El BEP desarrollado muestra una clara adecuación a las necesidades del bien estudiado y constituye una propuesta metodológica replicable en contextos similares, alineándose con experiencias exitosas reportadas en trabajos como los de Marquinho del Pezo Manya (2022) e Isabel Jordán Palomar (2023). La incorporación de niveles de desarrollo geométrico (LOD), niveles de información (LOI) y niveles de conocimiento (LOK) permitió un control preciso de la calidad y la trazabilidad del modelo.

En cuanto al desarrollo de experiencias inmersivas de realidad virtual, se logró la exportación eficaz del modelo HBIM a Unreal Engine 5 mediante Datasmith, preservando la coherencia geométrica y semántica. El entorno virtual resultante posibilita la exploración de la capilla en un espacio tridimensional inmersivo, integrando información arquitectónica y artística de manera accesible. La combinación de visualización inmersiva con estrategias de gamificación adaptada, inspirada en propuestas como las de (Sanfilippo et al., 2023), refuerza el potencial educativo y divulgativo del patrimonio cultural.

Un aspecto destacado del proyecto ha sido la atención a la accesibilidad e inclusión, mediante la producción de prototipos táctiles impresos en 3D, planos hápticos y guías con texto en braille. La metodología aplicada para el diseño de estos elementos responde a los principios descritos por (Coughlan et al., 2023) evidenciando una preocupación real por ampliar



el acceso al patrimonio para colectivos con discapacidad visual o cognitiva. Estas acciones se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 10 sobre reducción de desigualdades y el ODS 11.4 sobre protección del patrimonio cultural.

Finalmente, la evaluación de la aplicabilidad y escalabilidad del protocolo metodológico sugiere que este puede ser adaptado a otros entornos patrimoniales de tipologías diversas, siempre que se ajusten ciertos parámetros iniciales como la complejidad geométrica del bien, la disponibilidad de datos de base y los recursos tecnológicos disponibles. El enfoque HBIM desarrollado no solo facilita la conservación y documentación del patrimonio, sino que también abre nuevas vías para su difusión y apropiación social, posicionando al modelo digital como un agente activo en la preservación del valor cultural.

En suma, los resultados obtenidos reflejan un cumplimiento satisfactorio de los objetivos planteados y demuestran la viabilidad de integrar tecnologías avanzadas de modelado digital, gestión de datos, realidad inmersiva y accesibilidad inclusiva en la gestión contemporánea del patrimonio arquitectónico.

5.2. Beneficios del enfoque HBIM aplicado a patrimonio

La implementación del enfoque Heritage Building Information Modeling (HBIM) en la gestión patrimonial de la Capilla de San Francisco de Borja ha permitido constatar una serie de beneficios sustantivos que refuerzan su pertinencia como herramienta estratégica en la conservación y valorización del patrimonio construido.

Uno de los beneficios más destacados es la centralización y estructuración de la información patrimonial en un único entorno digital integrado. A diferencia de los métodos tradicionales de documentación fragmentada, el modelo HBIM desarrollado reúne datos geométricos, constructivos, históricos, materiales y patológicos, permitiendo una consulta simultánea, actualizada y trazable. Esta capacidad de integrar múltiples capas de conocimiento convierte al HBIM en un repositorio de memoria arquitectónica viva, alineado con las nuevas tendencias de gestión inteligente del patrimonio.

Asimismo, la posibilidad de vincular diagnósticos patológicos directamente sobre la geometría tridimensional facilita una evaluación más precisa del estado de conservación, optimizando la planificación de intervenciones futuras. En este sentido, la metodología aplicada permite no solo representar el estado actual del bien, sino anticipar dinámicas de deterioro, evaluar riesgos y proponer estrategias de conservación preventiva basadas en datos objetivos, siguiendo las directrices establecidas en estudios recientes como los de Yang et al. (2020).



Otro aspecto fundamental ha sido la generación de bases sólidas para la accesibilidad, la difusión cultural y la innovación en la experiencia patrimonial. La exportación del modelo HBIM hacia entornos inmersivos mediante Unreal Engine 5, a través del flujo de trabajo optimizado con Datasmith, ha permitido construir un gemelo digital interactivo de la Capilla de San Francisco de Borja. Este entorno virtual no se limita a la mera reproducción geométrica del espacio, sino que incorpora capas de información histórica, artística y material, accesibles a través de la navegación, la interacción y la activación sensorial.

El diseño de la experiencia VR responde a criterios de inclusión, accesibilidad universal y participación activa, ofreciendo alternativas para públicos diversos, incluyendo personas con discapacidad visual, cognitiva o motriz. Se han integrado elementos de narración sonora, modelos simplificados para orientación háptica, códigos de colores accesibles, y modalidades de gamificación adaptada, siguiendo las mejores prácticas descritas en estudios como el de (Sanfilippo et al., 2023).

La posibilidad de recorrer virtualmente el espacio, activar información contextual sobre los elementos artísticos (como las obras de Goya y Maella) y experimentar diferentes niveles de interacción, transforma radicalmente la relación del público con el patrimonio, superando las barreras físicas tradicionales. Esta estrategia no solo amplía el impacto social y educativo del proyecto, sino que también abre nuevas líneas de gestión patrimonial innovadora, situando al gemelo digital como un instrumento dinámico de preservación, interpretación y democratización cultural.

La adopción de un Plan de Ejecución HBIM (HBEP) previo a la fase de modelado ha demostrado ser un factor crítico de éxito en el proceso metodológico. La elaboración temprana del HBEP permitió definir con claridad los niveles de desarrollo geométrico (LOD), de información (LOI) y de conocimiento (LOK) necesarios en cada fase del proyecto, estableciendo criterios objetivos para el modelado, la asignación de atributos, la gestión de archivos, y la interoperabilidad entre plataformas. Esta planificación previa no solo optimizó los tiempos de trabajo y redujo la posibilidad de errores de interpretación, sino que aseguró la coherencia metodológica a lo largo de todo el flujo de trabajo, facilitando también la futura replicabilidad del protocolo en otros bienes patrimoniales.

Además, contar con un HBEP adaptado a patrimonio permitió anticipar aspectos críticos como la gestión de nubes de puntos, la organización de familias paramétricas específicas, la estructuración de bases de datos históricas y la preparación de los archivos para su migración a entornos de realidad virtual. Esta previsión estratégica minimizó la improvisación y mejoró la calidad final del producto, evidenciando la importancia de concebir la metodología HBIM no solo como un proceso técnico de modelado, sino como una planificación estructurada del conocimiento patrimonial.



En conjunto, el enfoque HBIM aplicado a la Capilla de San Francisco de Borja, reforzado mediante un HBEP adecuado, ha permitido superar las limitaciones tradicionales de la documentación patrimonial, optimizar la gestión de datos, facilitar la conservación preventiva, ampliar el acceso a públicos diversos y consolidar una nueva vía para la valorización cultural a través de la tecnología.

5.3. Retos técnicos, metodológicos y operativos

A pesar de los resultados positivos alcanzados, la implementación de una metodología HBIM aplicada a la gestión patrimonial de la Capilla de San Francisco de Borja ha evidenciado una serie de retos que es importante analizar críticamente, tanto para comprender las limitaciones actuales como para proponer mejoras en futuras aplicaciones.

Desde el punto de vista técnico, uno de los principales desafíos ha sido el manejo y procesamiento de las nubes de puntos de alta densidad. La necesidad de equilibrar la precisión geométrica con la manejabilidad del archivo obligó a realizar procesos de limpieza, segmentación y reducción controlada de datos en Autodesk ReCap y Navisworks. La gestión de grandes volúmenes de información, en términos de capacidad computacional y tiempos de procesamiento, representó una limitación relevante, especialmente en fases de modelado detallado y exportación a entornos de visualización inmersiva.

Otro reto técnico significativo fue la interoperabilidad entre plataformas digitales. Aunque el uso del plugin Datasmith permitió una transferencia relativamente fluida del modelo HBIM desde Revit hacia Unreal Engine 5, fue necesario realizar ajustes manuales en las texturas, la asignación de materiales y la jerarquización de objetos, con el fin de garantizar una representación fiel y optimizada del entorno virtual. Este proceso de ajuste evidenció que, si bien existen flujos de trabajo HBIM-to-VR ya consolidados en términos generales, persisten fricciones técnicas que deben ser consideradas cuidadosamente durante la planificación de proyectos similares.

Además, la programación y diseño de la interfaz de usuario (UI) en el entorno VR representó un desafío adicional de gran importancia. El desarrollo de una experiencia inmersiva accesible y funcional exigió el manejo de conocimientos especializados en programación visual (Blueprints) y en flujos de interacción propios de Unreal Engine, ámbitos que no son comunes en el perfil tradicional de modeladores BIM o técnicos patrimoniales. La necesidad de coordinar la lógica de navegación, la activación de contenidos informativos y la adaptación a dispositivos de realidad virtual evidencia la complejidad creciente que supone integrar patrimonio, HBIM y VR en proyectos reales, subrayando la necesidad de enfoques interdisciplinarios y competencias híbridas en futuros desarrollos.

En el ámbito metodológico, uno de los retos principales fue la definición y aplicación adecuada de los niveles de conocimiento (LOK) en el modelo HBIM. La heterogeneidad y a



veces la fragmentación de la información histórica disponible dificultaron la asignación precisa de ciertos elementos constructivos a fases históricas específicas. Esta situación evidencia la necesidad de establecer protocolos claros para la gestión de incertidumbres en el modelado patrimonial, tal como sugieren Castellano-Román y Pinto-Puerto (2019), especialmente en bienes con múltiples intervenciones documentadas y no documentadas a lo largo del tiempo.

Asimismo, la modelación de geometrías complejas e irregulares, características típicas de los edificios patrimoniales, representó un desafío continuo. La creación de familias paramétricas específicas, adaptadas a las deformaciones y singularidades de los elementos arquitectónicos, demandó un esfuerzo adicional en términos de tiempo y habilidades técnicas especializadas en modelado patrimonial avanzado.

Desde el punto de vista operativo, la planificación del proyecto reveló la importancia crítica de contar con un Plan de Ejecución HBIM (HBEP) claramente definido desde las etapas iniciales. No obstante, algunos ajustes metodológicos fueron necesarios a lo largo del proceso, como la redefinición de ciertos niveles de detalle (LOD) y la reorganización de fases de exportación hacia VR. Estos ajustes demuestran que, en entornos reales de aplicación patrimonial, es necesario mantener una flexibilidad metodológica controlada para responder a imprevistos o variaciones en la disponibilidad de datos.

Finalmente, en relación con la estrategia de accesibilidad e inclusión, si bien se lograron avances importantes en la implementación de prototipos táctiles y experiencias sensoriales, persiste el reto de integrar de forma sistemática parámetros de accesibilidad universal en entornos VR más complejos, especialmente para usuarios con discapacidades cognitivas o motrices severas. Además, se debe implementar una fase de pruebas para evaluar la calidad visual, la fluidez de navegación y la comprensión de los contenidos presentados. Los resultados preliminares son de vital importancia para el desarrollo de la experiencia VR, y poder mejorar la narrativa y la accesibilidad de la experiencia para públicos generales.

En conjunto, estos retos no disminuyen los logros alcanzados, sino que aportan una visión realista y crítica sobre los desafíos inherentes a la digitalización patrimonial avanzada, contribuyendo a perfeccionar las metodologías futuras y a enriquecer el debate académico y profesional sobre el papel de las tecnologías digitales en la conservación, gestión y difusión del patrimonio cultural.



5.4. Reflexión sobre la accesibilidad y el impacto social

Uno de los aspectos más relevantes de este trabajo ha sido la incorporación sistemática de estrategias de accesibilidad universal en el diseño de las experiencias patrimoniales digitales. Desde el inicio del proyecto, la accesibilidad no fue concebida como un añadido opcional, sino como un principio estructural que guía el desarrollo de los modelos HBIM, la selección de tecnologías y la creación de recursos inclusivos.

La producción de prototipos táctiles impresos en 3D, planos hápticos accesibles y guías con sistemas braille representa una innovación significativa dentro de las prácticas de gestión patrimonial digital. Siguiendo las recomendaciones de (Coughlan et al., 2023) estas estrategias permitieron ampliar el acceso al patrimonio cultural a personas con discapacidad visual o con dificultades de orientación espacial, promoviendo un modelo de participación más justo y equitativo.

De manera complementaria, el diseño del entorno de realidad virtual consideró la integración de recursos de narración sonora, elementos de orientación visual accesible (uso de colores contrastantes y jerarquías claras) y simplificación de controles de navegación, en línea con los principios de la Design for All Foundation y las mejores prácticas recogidas en proyectos recientes de museografía inmersiva. Aunque queda aún camino por recorrer para lograr una accesibilidad VR completamente universal, los primeros resultados son prometedores y demuestran que la tecnología, cuando es planificada desde una perspectiva inclusiva, puede convertirse en un poderoso instrumento de democratización cultural.

En términos de impacto social, el trabajo desarrollado se alinea con las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular:

- ODS 10 (Reducción de desigualdades), al fomentar el acceso igualitario a la cultura para colectivos históricamente excluidos.
- ODS 11.4 (Protección y salvaguarda del patrimonio cultural), al utilizar tecnologías innovadoras no solo para conservar, sino también para hacer más accesible el conocimiento patrimonial.

Asimismo, la experiencia generada muestra cómo la accesibilidad no debe ser vista únicamente como un "requisito técnico" o una "obligación normativa", sino como una oportunidad transformadora que enriquece el propio concepto de patrimonio, permitiendo nuevas formas de relación emocional, cognitiva y sensorial con los espacios históricos.



Finalmente, este proyecto subraya que la verdadera innovación en la gestión del patrimonio no reside únicamente en la aplicación de tecnologías avanzadas, sino en la capacidad de integrar valores sociales, culturales y humanos en cada fase del proceso. En este sentido, la accesibilidad y la inclusión no son solo un objetivo alcanzado, sino un principio metodológico que debe guiar cualquier futuro desarrollo en el ámbito de la conservación y difusión del patrimonio cultural.

6. Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo presenta las principales conclusiones derivadas de la investigación realizada, valorando de manera crítica el cumplimiento de los objetivos planteados, las aportaciones metodológicas desarrolladas y los resultados obtenidos. A través de un análisis sintético y reflexivo, se establecen los logros alcanzados, las limitaciones identificadas durante el proceso y las oportunidades de mejora que emergen del trabajo.

Asimismo, se formulan una serie de recomendaciones orientadas a la continuación y replicabilidad del protocolo metodológico HBIM-to-VR propuesto, tanto en otros entornos patrimoniales como en nuevas líneas de investigación que profundicen en la gestión digital del patrimonio cultural desde una perspectiva inclusiva, sostenible e innovadora.

La reflexión final busca no solo evaluar el alcance de la propuesta en el caso de estudio de la Capilla de San Francisco de Borja, sino también proyectar su contribución al avance del campo de la conservación patrimonial apoyada en tecnologías digitales emergentes.

6.1. Resumen de hallazgos y aportes de la investigación

La investigación realizada ha permitido validar la efectividad del enfoque HBIM-to-VR como una metodología integral para la gestión inteligente, conservación preventiva, difusión inclusiva y valorización del patrimonio arquitectónico. La aplicación práctica en la Capilla de San Francisco de Borja ha evidenciado una serie de hallazgos y aportaciones relevantes en los ámbitos técnico, metodológico, social y cultural.

Entre los principales hallazgos destaca la viabilidad de construir un modelo HBIM que no solo representa con alta fidelidad la geometría del bien patrimonial, sino que también integra información histórica, constructiva y de conservación de manera estructurada, permitiendo su consulta dinámica y su actualización futura. El modelo generado constituye, por tanto, un verdadero repositorio de conocimiento patrimonial, alineado con las tendencias actuales de gestión digital en el ámbito del patrimonio cultural.



El desarrollo de un Plan de Ejecución HBIM (HBEP) específico para patrimonio histórico ha demostrado ser un instrumento clave para garantizar la coherencia, la eficiencia y la trazabilidad de todo el flujo de trabajo, desde el levantamiento de datos hasta la generación de experiencias inmersivas. Este aporte metodológico refuerza la importancia de adaptar los marcos de trabajo BIM convencionales a las particularidades y necesidades de los bienes históricos, como ya proponían investigaciones recientes en la materia.

Asimismo, la investigación ha confirmado el potencial de las tecnologías inmersivas (VR/AR) no solo para mejorar la difusión y comunicación del patrimonio, sino también para fomentar estrategias de accesibilidad e inclusión social. La creación de prototipos táctiles en 3D, planos hápticos y recorridos virtuales accesibles constituye una innovación aplicada que amplía los públicos del patrimonio y contribuye a democratizar el acceso a la cultura, en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Otro aporte significativo ha sido la exploración crítica de los niveles de conocimiento (LOK) en el modelado patrimonial, permitiendo gestionar de forma adecuada las incertidumbres históricas y documentales inherentes a este tipo de bienes. Esta dimensión epistémica del HBIM refuerza su valor como herramienta no solo técnica, sino también de construcción de conocimiento histórico-arquitectónico.

Finalmente, el protocolo metodológico desarrollado en esta investigación se presenta como un modelo transferible y escalable, capaz de adaptarse a otros contextos patrimoniales con las adecuaciones pertinentes, contribuyendo al avance de la digitalización responsable y sostenible del patrimonio cultural.

6.2. Limitaciones del estudio

Si bien los resultados alcanzados en esta investigación son satisfactorios y demuestran el potencial del enfoque HBIM-to-VR aplicado al patrimonio arquitectónico, es necesario reconocer una serie de limitaciones que condicionaron en cierta medida el desarrollo y la ejecución del proyecto.

Una primera limitación significativa se relaciona con la gestión de grandes volúmenes de datos derivados del escaneo láser 3D. La alta densidad de las nubes de puntos obtenidas implicó procesos intensivos de limpieza, segmentación y optimización, imprescindibles para garantizar la manejabilidad de los archivos en las plataformas de modelado y visualización. Aunque estas operaciones fueron realizadas con criterios de precisión, inevitablemente se produjeron pequeñas pérdidas de microdetalle geométrico, lo que constituye un



compromiso habitual en flujos de trabajo que deben equilibrar fidelidad documental y eficiencia operativa.

Adicionalmente, el levantamiento de zonas de gran altura —particularmente en las bóvedas, claves de arcos y detalles ornamentales superiores— presentó importantes desafíos. La limitada cobertura del escáner terrestre, junto con la imposibilidad de disponer de plataformas elevadoras o de drones equipados para fotogrametría aérea, restringió la captura exhaustiva de ciertos sectores elevados del bien patrimonial. Esta dificultad afectó parcialmente la completitud de los datos en algunas áreas, evidenciando la necesidad de integrar, en futuros proyectos, estrategias de levantamiento combinadas que permitan suplir las restricciones de accesibilidad física y mejorar la documentación de zonas inaccesibles.

Asimismo, la interoperabilidad entre plataformas presentó fricciones técnicas que requirieron ajustes manuales durante la migración de modelos de Revit a Unreal Engine 5, especialmente en lo referente a la conservación de materiales, texturas y jerarquías de objetos. Estas dificultades pusieron de manifiesto la necesidad de desarrollar flujos de trabajo más estandarizados y optimizados para garantizar una transferencia de información más fluida en proyectos futuros.

Desde el punto de vista metodológico, se identificó una limitación en la obtención y disponibilidad de la información histórica sobre ciertos elementos constructivos de la Capilla de San Francisco de Borja. Esta falta de datos precisos obligó a trabajar en algunos casos con niveles de conocimiento (LOK) intermedios o con aproximaciones basadas en evidencias indirectas. Aunque esta situación es común en proyectos patrimoniales, resalta la importancia de implementar estrategias de gestión e integración en la documentación HBIM.

En cuanto al desarrollo de estrategias de accesibilidad, si bien se lograron avances significativos con la creación de prototipos táctiles y planos hápticos, la accesibilidad completa en el entorno de realidad virtual aún representa un desafío. El diseño de interfaces de usuario adaptadas para personas con discapacidad motriz o cognitiva severa requiere conocimientos especializados en programación y diseño de interacción que excedieron el alcance inicial del proyecto.

Finalmente, debe mencionarse que la escala del caso de estudio —centrado en una capilla de dimensiones moderadas dentro de un conjunto catedralicio mayor— condiciona la generalización inmediata del protocolo a bienes patrimoniales de escala urbana o territorial, donde podrían requerirse adaptaciones específicas en los métodos de levantamiento, modelado y gestión de datos.



6.3. Recomendaciones y futuras líneas de investigación

La investigación desarrollada a lo largo de este trabajo ha permitido identificar numerosas oportunidades para el perfeccionamiento de la metodología HBIM y su integración con tecnologías emergentes en el ámbito del patrimonio cultural. A partir de los resultados obtenidos y las limitaciones encontradas, se proponen las siguientes recomendaciones y líneas de investigación futuras:

En primer lugar, se destaca la necesidad de incorporar sistemas avanzados de monitorización estructural basados en Internet of Things (IoT). La instalación de sensores IoT en edificios patrimoniales permitiría recopilar datos en tiempo real sobre parámetros como humedad, temperatura, vibraciones o cargas estructurales, proporcionando una base sólida para el mantenimiento predictivo. Esta estrategia no solo optimizaría los recursos destinados a la conservación, sino que contribuiría a prevenir daños graves mediante alertas tempranas y análisis de tendencias (Fiorenza et al., 2025).

En línea con esta evolución, se recomienda la profundización en el desarrollo de gemelos digitales patrimoniales enriquecidos con sensores inteligentes, capaces de integrar datos históricos, modelados HBIM y lecturas en tiempo real. Esta convergencia permitiría, además, mejorar la capacidad de simulación de escenarios de deterioro y evaluar el impacto de diversas estrategias de intervención antes de su implementación práctica (Suhari et al., 2024).

Otra dirección relevante para futuras investigaciones consiste en la automatización de flujos de trabajo HBIM-to-VR. Tal como han demostrado estudios recientes, la generación semi-automatizada de entornos inmersivos a partir de modelos HBIM enriquecidos (utilizando estándares abiertos como IFC) podría democratizar el acceso a la creación de experiencias patrimoniales digitales, facilitando su adopción por instituciones con menos recursos técnicos (Fiorenza et al., 2025).

Asimismo, se sugiere explorar el potencial de las estrategias de accesibilidad aumentada, combinando tecnologías hápticas, realidad virtual accesible y modelos impresos en 3D para ampliar el rango de públicos que puedan interactuar con el patrimonio cultural. La inclusión de audiodescripciones dinámicas generadas por TTS (Text-to-Speech) y la integración de guías virtuales adaptativas representan líneas de innovación prometedoras (Fiorenza et al., 2025; Shahab et al., 2023).

Finalmente, resulta imprescindible avanzar en la definición de protocolos normalizados para la documentación y gestión digital del patrimonio. Si bien existen avances significativos como los promovidos por buildingSMART (2018), aún persisten desafíos en cuanto a la interoperabilidad de datos culturales y técnicos. Una línea de investigación futura debería



centrarse en la estandarización de los niveles de conocimiento (LOK) en HBIM, asegurando así modelos más robustos, reutilizables y escalables para su preservación y difusión.

En suma, la convergencia entre HBIM, gemelos digitales, IoT y VR abre un horizonte de posibilidades para una gestión patrimonial más eficiente, preventiva, inclusiva y orientada al futuro.

7. Bibliografía

- Angjeliu, G., Coronelli, D., & Cardani, G. (2020). *Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality*. Computers and Structures, 238, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106282>
- Angulo Fornos, R. (2019). Desarrollo de modelos digitales de información y la gestión en el patrimonio arquitectónico y la gestión en el patrimonio arquitectónico: Desarrollo de modelos digitales de información. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Bertacchi, G. (2022). Guidelines for the Management of Cultural Heritage using 3D Models for the Insertion of Heterogeneous Data. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València – Università di Bologna.
- BuildingSMART Spanish Chapter. (2018). Guía BIM para Patrimonio Cultural. <https://www.buildingsmart.es/recursos/gu%C3%ADas-ubim/>
- Castellano-Román, M., & Pinto Puerto, F. (2019). Dimensions and Levels of Knowledge (LOK) in HBIM for Historic Buildings. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, 237–243. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-237-2019>



- Chen, Y., et al. (2024). Virtual Reality for Cultural Heritage Preservation: Opportunities and Challenges in China. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1016/j.jchmsd.2024.01.010>
- Cortés Meseguer, L. (2014). *La construcción del proyecto neoclásico de la Catedral de Valencia* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València.
- Coughlan, T., Ritsos, P. D., Holloway, L., Marriott, K., & Smith, D. (2023). *TactIcons: Designing 3D Printed Map Icons for People who are Blind or have Low Vision*. Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3544548.3580800>
- Dore, C. and Murphy, M. (2017), “Current state of the art historic Building Information Modelling”, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W5.
- Escudero, P. A. (2021). La gestión eficiente de los bienes patrimoniales mediante la aplicación de la metodología HBIM: El caso de la Iglesia de San Lorenzo en Valencia. Trabajo Final de Máster, Universitat Politècnica de València.
- Fai, S., & Rafeiro, J. (2014). Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a Building Information Model (BIM): West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 123–130. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-123-2014>
- Fiorenza, L., Cardellicchio, L., Globa, A., & Stracchi, P. (2024). Enhancing HBIM-to-VR workflows: Semi-automatic generation of enriched IFC files for immersive experiences. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.03.007>
- Fiorenza, L., et al. (2025). Enhance HBIM-to-VR: New opportunities for immersive heritage dissemination. *Frontiers of Architectural Research*. (Artículo en prensa, pre-print compartido).
- Guía BIM-Patrimonio Cultural. (2018). Guía de aplicación de metodología BIM a bienes patrimoniales. BuildingSMART Spanish Chapter. <https://www.buildingsmart.es/recursos/gu%C3%ADas-ubim/>



- Hou, L., et al. (2023). Digital twin application in heritage facilities: Review and directions. *Automation in Construction*, 136, 104177. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104177>
- Johansson, M., Roupé, M., & Bosch-Sijtsema, P. (2015). Real-time visualization of building information models (BIM). *Automation in Construction*, 54, 69–82. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.018>
- Jordán Palomar, I. (2019). Protocol to manage heritage-building interventions using Heritage Building Information Modelling (HBIM). Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Jordán-Palomar, I., Tzortzopoulos, P., García-Valldecabres, J., & Pellicer, E. (2018). Protocol to Manage Heritage-Building Interventions Using HBIM. *Sustainability*, 10(4), 908. <https://doi.org/10.3390/su10040908>
- Levent, N., & Pascual-Leone, A. (Eds.). (2014). *The multisensory museum: Cross-disciplinary perspectives on touch, sound, smell, memory, and space*. Rowman & Littlefield.
- Liu, Z., Zhang, A., & Wang, W. (2020). A Framework for an Indoor Safety Management System Based on Digital Twin. *Sensors*, 20(20), 5771. <https://doi.org/10.3390/s20205771>
- Marquinho Del Pezo Manya, A. (2023). *La definición de un protocolo para la creación de modelos federados en Historic Building Information Modelling (HBIM) y la gestión de procesos a través de un Plan de Ejecución HBIM (BEP). El caso de la capilla de San José de la Catedral Metropolitana de Valencia* [Trabajo Final de Máster, Universitat Politècnica de València]. Repositorio UPV.
- Ministerio de Cultura de España. (2024). Comparación entre formas de obtención de nubes de puntos aplicadas al patrimonio histórico. Informe técnico interno.
- Mol, L., Viles, H., Pinho, L., & Webb, N. (2020). Stone heritage conservation: A review of diagnostic techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 42, 215–230.
- Montusiewicz, J.; Barszcz, M.; Korga, S. (2022). Preparation of 3D Models of Cultural Heritage Objects to Be Recognised by Touch by the Blind—Case Studies. *Appl. Sci.* 2022, 12, 11910. <https://doi.org/10.3390/app122311910>
- Morea Núñez, J. M., & Zaragoza Angulo, J. M. (2015). *Guía práctica para la implantación de entornos BIM en despachos de arquitectura técnica*. Madrid: Editorial Fe d'erratas.



- Murphy, M., McGovern, E. and Pavia, S. (2009), “Historic building information modelling (HBIM)”, *Structural Survey*, Vol. 27 No. 4, pp. 311–327.
- Sanfilippo, F., Tataru, M., Hua, M. T., Johansson, I. J. S., & Andone, D. (2023). *Gamifying cultural immersion: Virtual reality (VR) and mixed reality (MR) in city heritage exploration*. Politehnica University of Timisoara. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.16806>
- Saygi, G., & Remondino, F. (2013). Review of range and image-based 3D modeling for cultural heritage documentation. *Journal of Cultural Heritage*, 14(1), 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.002>
- Shahab, S., et al. (2023). 3D printing for accessibility: A review on improving inclusivity for the visually impaired. *Assistive Technology*, 35(1), 41–56. <https://doi.org/10.1080/10400435.2021.2008812>
- Stracchi, P., Cardellicchio, L., & Globa, A. (2024). Digital heritage construction: Testing the heritage value of construction documentation and building processes through Virtual Reality. *Frontiers of Architectural Research*, 13(5), 1039–1055. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.02.012>
- Suhari, M., Rahman, A., & Ghaffar, A. (2024). Heritage Building Digital Twins: Challenges and Opportunities. *Applied Sciences*, 14(5), 1910. <https://doi.org/10.3390/app14051910>
- Vecco, M. (2010). A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.01.006>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., & Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>
- Yang, T., Huang, Y., & Zhou, X. (2020). Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Automation in Construction*, 117, 103265. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103265>



- Yang, T., Huang, Y., & Zhou, X. (2024). Creating Meta-Heritage Environments: HBIM-Based Digital Twins and Immersive Interaction in Suzhou's Heritage Sites. *Automation in Construction*, 157, 105197. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105197>

7.1. Fuentes web

- Agencia Estatal de Investigación. (2022). Proyecto PID2020-119088RB-I00 – HBIM-SIG-TUR: Análisis y desarrollo de la integración HBIM en SIG para la planificación turística del patrimonio cultural. Recuperado el 26 de abril de 2025, de <https://hbim-sigtur.webs.upv.es/proyecto-y-objetivos/>
- A11yVR - Accessibility Virtual Reality. (2023). Accessibility Virtual Reality Experience [Video]. YouTube. Recuperado el 26 de abril de 2025, de https://www.youtube.com/watch?v=Hpv6wtasRTw&ab_channel=A11yVR-AccessibilityVirtualReality
- Catedral de Valencia. (2025). Capilla de San Francisco de Borja. Recuperado el 26 de abril de 2025, de <https://catedraldevalencia.es/arte/recorrido-interior-catedral/capilla-de-san-francisco-de-borja/>
- Fundación Goya en Aragón. (s.f.). San Francisco de Borja asistiendo a un moribundo. Recuperado el 26 de abril de 2025, de <https://fundaciongoyaenaragon.es/obra/san-francisco-de-borja-asistiendo-a-un-moribundo/127>
- Fundación Goya en Aragón. (s.f.). San Francisco de Borja despidiéndose de su familia. Recuperado el 26 de abril de 2025, de <https://fundaciongoyaenaragon.es/obra/san-francisco-de-borja-despidiendose-de-su-familia/125>
- FTA Art. (s. f.). *San Francisco de Borja ante el cadáver de la emperatriz Isabel* [Imagen]. Fundación Telefónica Arte. <https://app.fta.art/es/artwork/bff2daf6ffbccd582d9dc7128096b85dc8f32661>
Consulta: 1 de mayo de 2025.
- GhostBull. (s. f.). *Puerta suprema de la armonía* [Imagen]. Theasys. Recuperado el 30 de abril de 2025, de <https://www.theasys.io/viewer/loewEI5IOs88dOyPNOU54vriYm2J6F/>



- Impresoras3D.com. (s. f.). Touch Mapper: Mapas 3D para discapacitados visuales [Fotografía]. <https://www.impresoras3d.com/touch-mapper-mapas-3d-para-discapacitados-visuales/> (Consulta: 29 de abril de 2025)
- Museo Nacional del Prado. (s. f.). *El Museo Nacional del Prado se hace más inclusivo* [Fotografía]. <https://www.museodelprado.es/actualidad/noticia/el-museo-nacional-del-prado-se-hace-mas-inclusivo/c1a182ce-bf79-e9e7-a055-507b47468b29> (Consulta: 29 de abril de 2025)

8. Anexos