

EMPLEO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA SÍNTESIS DE MATERIALES BASADOS EN FÍSICA EN RECONSTRUCCIÓN PATRIMONIAL

AI-DRIVEN SYNTHESIS OF PBR MATERIALS FOR VIRTUAL HERITAGE RECONSTRUCTION

José Alejandro Vázquez Durán¹

{al.exvaz@hotmail.com¹}

Fecha de recepción: 30/03/2026 / Fecha de aceptación: 11/08/2026 / Fecha de publicación: 25/08/2026

RESUMEN: La digitalización del patrimonio arquitectónico evoluciona desde la documentación hacia un instrumento transversal de investigación, conservación preventiva y divulgación, donde la visualización 3D con renderización se basa en la demanda de materiales digitales plausibles para sostener la credibilidad de la representación. Sin embargo, la paradoja metodológica de las técnicas reality-based (fotogrametría y TLS) capturan con alta fidelidad geométrica el estado actual del bien, así como el registro de deterioros, pátinas y alteraciones que dificultan la materialidad histórica original como el caso de la erosión y las alteraciones cromáticas del granito fino ornamentado que oscurecen la apariencia primigenia de la Iglesia de Santa María de Sar en Santiago de Compostela. Por ello, este trabajo aborda la brecha entre lo existente-degradado y lo original-perdido mediante un método aplicado que desarrolla y documenta un flujo de trabajo integral para la síntesis de materiales PBR asistida por IA multimodal, integrado en un pipeline profesional (GIMP + Blender/Cycles). Los hallazgos técnicos muestran que la generación del albedo toma aproximadamente tres minutos, el resto de mapas PBR se derivan sistemáticamente en GIMP y se integran posteriormente en Blender. Desde la ética, se identifica que los modelos de IA crean debido a sus datos de entrenamiento, lo que exige una documentación explícita de parámetros, así los resultados demuestran que, bajo dirección experta la IA produce materiales PBR plausibles, concluyendo que el método es técnicamente viable y estéticamente coherente para divulgación e hipótesis de restitución, sin sustituir a la captura directa ni exime de la transparencia metodológica.

Palabras clave: *patrimonio cultural, patrimonio cultural digital, modelado 3D, materiales PBR, ingeniería de instrucciones*

ABSTRACT: The digitization of architectural heritage is evolving from mere documentation into a cross-cutting tool for research, preventive conservation, and dissemination, where 3D visualization with rendering relies on the demand for plausible digital materials to support the credibility of the representation. However, a

¹Grupo integrado de ingeniería civil y geomática, Universidad de Santiago de Compostela-España, <https://orcid.org/0009-0000-2763-3527>, +34 603655030



methodological paradox arises with reality-based techniques (photogrammetry and TLS), which capture the current state of the asset with high geometric fidelity, including the recording of deterioration, patinas, and alterations that obscure the original historical materiality—as in the case of erosion and chromatic alterations of fine ornamental granite that mask the original appearance of the Church of Santa María de Sar in Santiago de Compostela. Therefore, this work addresses the gap between the existing-degraded and the original-lost through an applied method that develops and documents a comprehensive workflow for the synthesis of PBR materials assisted by multimodal AI, integrated into a professional pipeline (GIMP + Blender/Cycles). The technical findings show that albedo generation takes approximately three minutes, the remaining PBR maps are systematically derived in GIMP and subsequently integrated into Blender. From an ethical perspective, AI models are found to introduce biases due to their training data, requiring explicit paradata documentation. Thus, the results demonstrate that, under expert guidance, AI produces plausible PBR materials, concluding that the method is technically viable and aesthetically coherent for dissemination and restitution hypotheses, without replacing direct capture or exempting methodological transparency.

Keywords: *cultural heritage, digital cultural heritage, 3D modeling, PBR materials, prompt engineering*

INTRODUCCIÓN

La digitalización del patrimonio arquitectónico amplía el alcance virtual desde el registro hacia un instrumento transversal para investigación, conservación preventiva y acceso público. En este contexto, los flujos de renderización basada en física (PBR) se generalizan en la visualización 3D patrimonial asociados a la búsqueda de representaciones materialmente creíbles; la credibilidad de la visualización depende críticamente de la calidad y plausibilidad de los materiales digitales aplicados al modelo (1, 2, 3, 4).

Sin embargo, existe una paradoja metodológica fundamental: mientras técnicas como fotogrametría y escaneo láser terrestre (TLS) permiten generar modelos 3D *reality-based* con alta fidelidad geométrica para documentar el estado actual de los bienes patrimoniales, dicho estado suele incorporar deterioro e intervenciones que dificultan la inferencia de la materialidad histórica original (5, 6, 7, 8, 9, 10). Esta discordancia se manifiesta con particular agudeza en la Iglesia de Santa María de Sar, donde elementos ornamentales en granito fino presentan erosión superficial y alteraciones cromáticas que oscurecen su apariencia original.

La teoría contemporánea del patrimonio digital reconoce que toda representación digital es inherentemente interpretativa, situándose entre la documentación del estado existente y la hipótesis de estados desaparecidos (11, 12, 13). Este espectro exige transparencia metodológica mediante paradata, requisito ético fundamental según la Carta de Londres (2009) (14) y los Principios de Sevilla (2017) (15) porque implica un doble desafío: técnico e interpretativo.

Los métodos convencionales de crear materiales digitales patrimoniales tienen dos categorías: la (1) fotogrametría que es el estándar para documentar el patrimonio existente a partir de producir texturas que registran patologías y degradaciones (16, 17, 18) a pesar de que, Vico-García et al. (2025) (19) señalan que limpiar estas texturas de los elementos anacrónicos resulta complejo y destructivo. Por lo que, en casos de pérdida material sustancial la fotogrametría carecería de datos fiables (11). Por consiguiente, el (2) modelado manual es la alternativa de crear materiales hipotéticos con la sintetización de información histórica y análogos arquitectónicos (20) aunque este enfoque sea intensivo en tiempo, su calidad dependerá de la habilidad subjetiva del creador porque su proceso rara vez sería reproducible o transparente, ya que contaría con el riesgo de reflejar concepciones estéticas contemporáneas (11, 21).

Contextualmente, los modelos de Inteligencia Artificial generativa (IA), en particular, los sistemas multimodales que confieren procesamiento de lenguaje natural y síntesis de imágenes proponen nuevas posibilidades para el patrimonio cultural (22). Modelos que operan como sistemas de inferencia estadística porque aprenden distribuciones de probabilidad sobre millones de pares texto-imagen para originar nuevas imágenes correspondientes a descripciones textuales (23). Por lo que, las aplicaciones iniciales de IA en el patrimonio cultural se concentran en restauración virtual de imágenes, categorización de artefactos o producción de variantes estilísticas (11, 22). Sin embargo, la aplicación específica a la síntesis de texturas PBR para la reconstrucción arquitectónica virtual representa un dominio teóricamente inexplorado con obstáculos como la escasez de data sets pareados y problemas de coherencia multicanal (24, 25, 26).

Esta aplicación debe tomar en cuenta precauciones fundamentales, ya que los modelos de IA generativa resultan ser sesgados por sus datos de entrenamiento extraídos de internet contemporáneo, lo que sugiere el riesgo de generar visiones anacrónicas del patrimonio (27). Además, su naturaleza estocástica choca con el ideal de reproducibilidad científica (28), y la teoría crítica del patrimonio digital enfatiza que estas tecnologías reconfiguran las relaciones de autoridad interpretativa (29).

En respuesta, la investigación propone un objetivo doble: desarrollar y documentar un flujo de trabajo integral que emplea modelos multimodales de IA (GPT-4 con DALL-E 3) para crear materiales PBR destinados a reconstrucción virtual del patrimonio; y aplicar este protocolo a la síntesis de texturas del granito fino original de la Iglesia de Santa María de Sar. La investigación se articula en torno a la pregunta de qué nivel de coherencia estética y viabilidad técnica es necesario para que el proceso se considere metodológicamente válido cuando se despliega dentro de un protocolo riguroso que parte de una especificación histórica contextualmente anclada, sigue un proceso de *prompt engineering* iterativo y culmina en posprocesamiento especializado.

La evaluación de validez opera en dos dimensiones interdependientes: la coherencia estética contextual, definida como el grado en que una textura generada es percibida como plausible e integrable en un modelo 3D según evaluación experta fundamentada en conocimiento histórico-material; y la viabilidad técnica reproducible, referida a la capacidad de un output de IA de ser procesado e integrado en un flujo de trabajo estándar de producción PBR para generar un material renderizable físicamente



coherente (30). Estos criterios se entrelazan con el concepto de *prompt engineering* patrimonial, entendido como el proceso sistemático de traducir conocimiento histórico-material en instrucciones precisas para dirigir un modelo generativo, práctica emergente como competencia especializada en la intersección entre investigación histórica, ciencia de materiales y lingüística computacional.

La fundamentalidad de esta investigación reincide en su contribución metodológica cerrar la brecha entre las capacidades emergentes de la IA y necesidades de la visibilización patrimonial a través de un flujo de trabajo estructurado y reproducible para demostrar técnicamente la integración de outputs de IA en pipelines profesionales (*Blender/Cycles*) y avanzar teóricamente en la discusión de los criterios de validez para la evaluación de reconstrucciones digitales que utilizan tecnologías generativas y, abrir un debate de la intersección del patrimonio digital y ética computacional (31, 32).

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación adquiere un enfoque de método aplicado, dado a que el objetivo central es diseñar, documentar y evaluar algún procedimiento técnico específico para la resolución de un problema práctico, como lo es la generación eficiente de materiales PBR hipotéticos para el patrimonio digital.

Mientras que una metodología constituye el marco que justifica el porqué de la investigación, un método describe el cómo operativo (33). En este caso, el qué es la evaluación de la viabilidad de la IA para síntesis de texturas patrimoniales; el por qué se expone en el marco teórico, basado en un paradigma interpretativo-crítico; y el cómo es el flujo de trabajo de cinco fases. Se trata de un método de desarrollo y evaluación de prototipos en humanidades digitales que sigue una lógica lineal y descriptiva, común en estudios de viabilidad tecnológica aplicada al patrimonio, donde el rigor reside en la transparencia descriptiva y la reproducibilidad del proceso (34).

La naturaleza del problema no es susceptible de medición cuantitativa estandarizada, ya que no existen métricas universalmente aceptadas para medir la coherencia histórica de una textura. La validación se fundamenta en una evaluación cualitativa experta, atendiendo a criterios de coherencia estético-histórica y funcionalidad técnica, mediante observación directa y análisis crítico de los resultados visuales, enfoque consistente con la investigación basada en diseño (35). La validez del método se deriva de la viabilidad observada del proceso y la credibilidad de los resultados ante una audiencia especializada.

La implementación requirió tres herramientas. Para la síntesis de imágenes se utilizó ChatGPT Plus (GPT-5.2 con DALL-E 3). El procesamiento de imágenes se realizó en GIMP 3.0.6. La integración de materiales y validación visual se llevó a cabo en Blender 4.5 con su motor Cycles para evaluar propiedades físicas bajo iluminación controlada (Tabla 1).



Tabla 1. Especificaciones técnicas de los programas y computadora empleados.

<i>Componente</i>	<i>Especificación</i>
Síntesis de imágenes	ChatGPT plus (DALL-E 3)
Procesamiento de texturas	GIMP 3.0.6
Modelado 3D y texturizado	Blender 4.5 / Cycles
Hardware mínimo recomendado	
Procesador	Ryzen 7 3700X
Memoria Ram	16 GB DDR4
Tarjeta grafica	NVIDIA RTX 2060 6GB
Almacenamiento	SSD 256 GB
Conexión a internet	Empleada por ChatGPT

El método aplicado se articula en cinco fases consecutivas, ilustradas en la Figura 1, que transforman una especificación histórica en un material digital. A continuación, se desglosa cada fase con sus outputs intermedios y las dificultades encontradas.



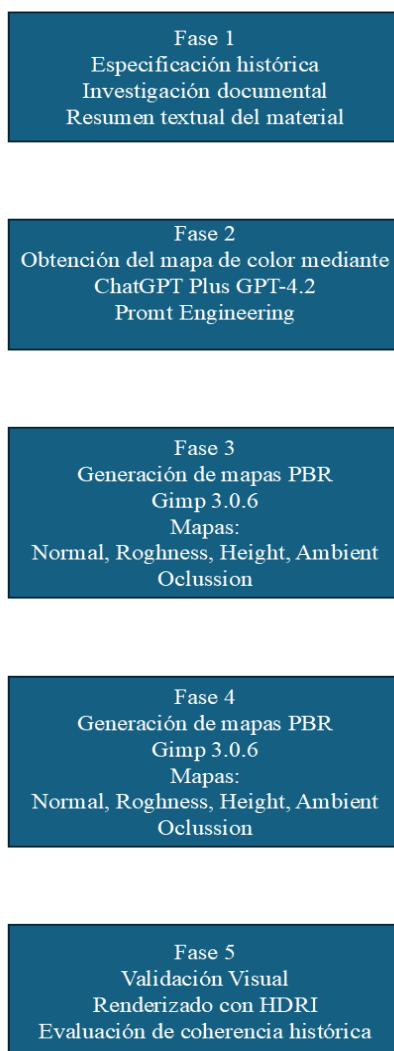


Figura 1. Diagrama del flujo de trabajo propuesto para la síntesis de materiales PBR.

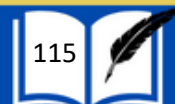
Fuente: elaboración propia.

2.1 Fase 1: Especificación histórica e investigación documental

Esta fase representa la primera etapa del flujo de trabajo empleado, la cual traduce la investigación histórica en una descripción textual, en este caso definirá las características del granito fino beige original, excluyendo patinas y deterioro documentado, además de seleccionar las imágenes que servirán de referencia para el material.

2.2 Fase 2: Síntesis de textura base mediante IA

La fase siguiente es la adecuación de la descripción textual generada para obtener un resultado aproximado, debido a que las imágenes de referencia incluyen daño por patina, musgo y sombras es necesario sortearlas con el ajuste debido al prompt. La descripción textual empleada para solucionar esto fue: "En base a las imágenes



proporcionadas, crea un mapa de albedo, seamless, 2k, de granito fino arenisca para la base de un material PBR".

2.3 Fase 3. Generación de mapas PBR en GIMP

El resultado obtenido tras el proceso de síntesis mediante ChatGPT se intervendrá mediante el empleo de GIMP, centrado en derivar los mapas complementarios. Para el mapa de normales, se convirtió el albedo a escala de grises y se aplicó el filtro Mapa de normales, ajustando la profundidad para obtener un relieve micro-superficial sutil.

El mapa de rugosidad se obtuvo manipulando la misma imagen en escala de grises; se invirtieron los tonos y se ajustó el contraste para asignar valores bajos de rugosidad a zonas claras y valores altos a zonas oscuras. El mapa de altura se derivó de la versión en grises del albedo, aplicando Desenfoque gaussiano y realzando el contraste. El mapa de oclusión ambiental se generó a partir del mapa de altura; se aplicó Desenfoque gaussiano y se ajustaron los Niveles para oscurecer selectivamente grietas y uniones. Cada mapa se ajustó para mantener coherencia física y visual con el albedo.

2.4 Fase 4: Integración en Blender

Los 5 mapas generados, tanto por IA como por GIMP se integran dentro de Blender siguiendo el flujo estándar establecido para materiales PBR. Así estos mapas conforman un material digital que se aplica al modelo 3D correspondiente, configurando las coordenadas UV y escala de textura para garantizar un empleo realista.

2.5 Fase 5: Validación visual

La última fase corresponde a la validación visual mediante renders de prueba con iluminación HDRI, lo que permite evaluar la coherencia visual del material, su respuesta física a la luz y su integración en un entorno virtual renderizado.

Cabe señalar que este estudio adopta un método aplicado cuya finalidad central es documentar y evaluar un procedimiento técnico concreto diseñado para resolver un problema práctico en visualización patrimonial. El método se fundamenta en la viabilidad observada del proceso y en la evaluación cualitativa del resultado atendiendo a criterios de coherencia estético-histórica y funcionalidad técnica en entorno PBR. La figura 1 esquematiza la secuencia operativa de las cinco fases que componen este flujo de trabajo, desde la definición conceptual del material hasta su validación final como activo digital, donde cada fase representa un módulo funcional específico dentro del pipeline de producción.

RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados visuales obtenidos en cada fase del flujo de trabajo, demostrando la viabilidad del método propuesto para generar materiales PBR patrimoniales mediante IA.

La ejecución inició en la interfaz de ChatGPT, que introdujo una descripción textual específica un *prompt* que combinó requisitos técnicos de producción (resolución 2K, formato *seamless*, tipo de mapa albedo) con un detalle específico de material histórico ("granito fino arenisca").

Para fundamentar visualmente esta especificación, se proporcionaron al modelo dos imágenes de referencia: 1) muestra de granito puro que definía la textura objetivo, y 2) una fotografía de un arco medieval existente en Santa María de Sar, construido con el mismo material, que aportó contexto arquitectónico y validación histórica. Este enfoque de *prompt engineering* multimodal permitió dirigir al modelo DALL-E 3 hacia la generación de una imagen base conceptualmente alineada con los objetivos de restitución patrimonial (Figuras 2 y 3).

La figura 2a muestra detalle del arco medieval de Santa María de Sar, construido con el granito arenisca que constituye el caso de estudio, mientras que 2b muestra de referencia del mismo material, que define la textura objetivo. Ambas imágenes fueron proporcionadas a la IA como contexto visual para guiar la generación del mapa de albedo técnicamente especificado en el *prompt* textual.

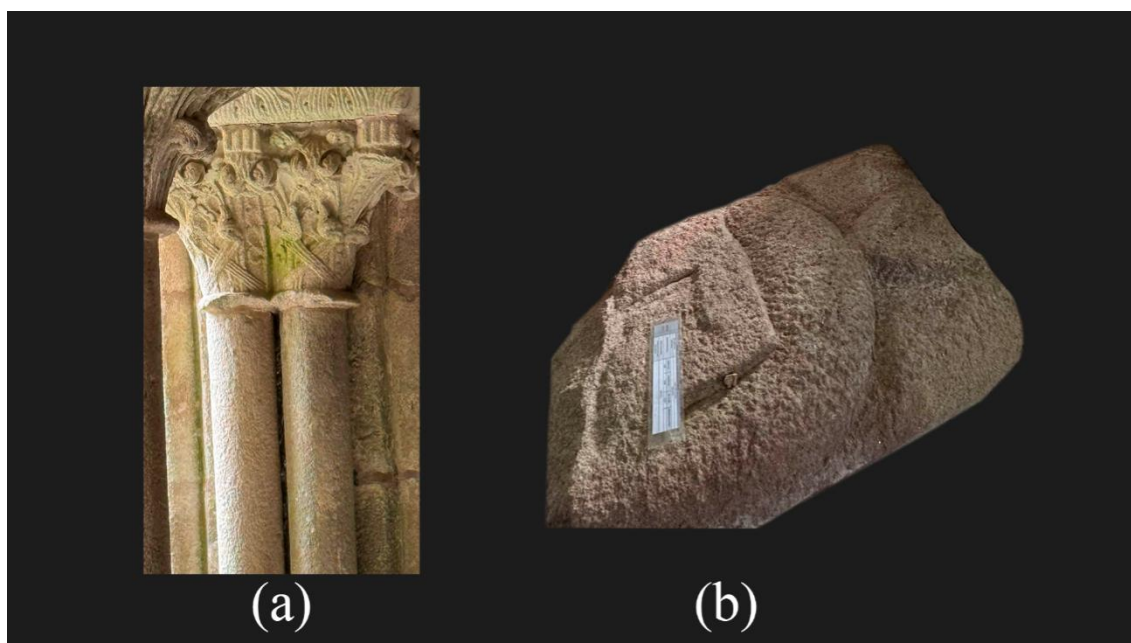


Figura 2. Imágenes de referencia.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 documenta el resultado de la fase de síntesis por IA, así mediante captura de la interfaz de ChatGPT muestra el *prompt* exacto que especificaba los requisitos técnicos y el contexto material. La imagen generada, producida en aproximadamente tres minutos, corresponde a un mapa de *albedo* con las características solicitadas, recibido en formato *seamless* y con iluminación neutralizada, listo para su posterior procesamiento.

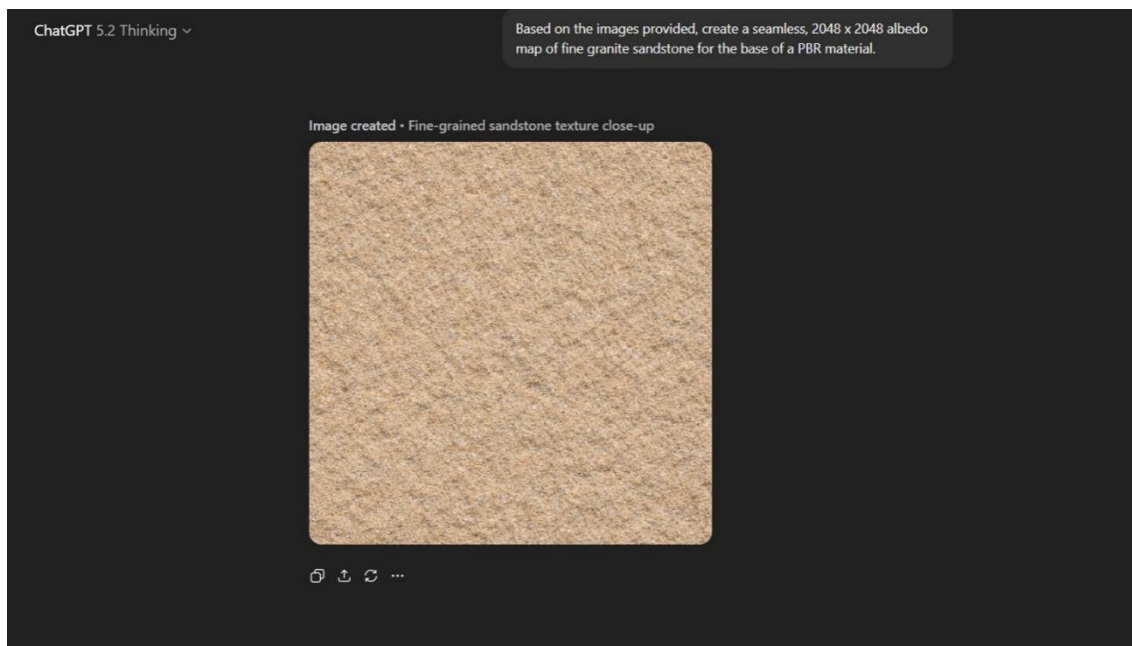


Figura 3. Proceso de síntesis mediante IA en ChatGPT.

Fuente: elaboración propia.

De este modo, al tener como base el mapa de *albedo* sintetizado por la IA, se procedió a la generación del conjunto completo de mapas que conforman un material PBR físicamente coherente dentro del entorno de GIMP. Este paso crítico de derivación convirtió la imagen base en un sistema de materiales listo para la renderización realista (figura 4).

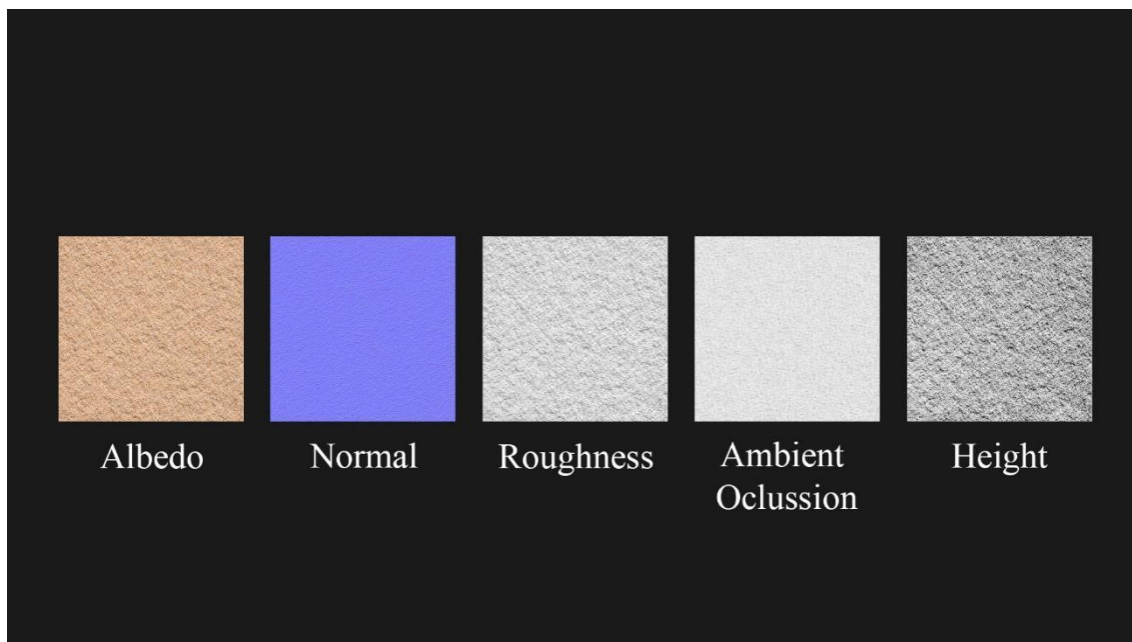


Figura 4. Mapas resultantes tras el postproceso en Gimp.

Fuente: elaboración propia.

La figura 4 muestra el conjunto de mapas PBR derivados de Gimp a partir del Albedo sintetizado por IA. La figura muestra todo el conjunto de mapas que en conjunto conforman el material físicamente basado: *Albedo*, que da el color al material; *Normal*, que se encarga de la micro geometría superficial del granito; *Roughness*, que define la variación del brillo especular; Oclusión ambiental (AO), que simula el sombreado en concavidades y juntas; y mapa de Altura (*height*), destinado a efectos de desplazamiento o *parallax*. La coherencia visual entre los mapas confirma la validez del *albedo* generado por IA como base para una derivación físicamente plausible.

Tras la obtención de todos los mapas que conforman el material PBR, *albedo*, *normales*, *rugosidad*, *altura* y *oclusión ambiental*, la siguiente fase consistió en su integración técnica dentro del entorno de Blender. Para ello se configuro un material bajo el motor de renders *Cycles* dentro del editor de nodos, donde se evidencia cómo estos cinco mapas se conectan sistemáticamente a las entradas correspondientes del shader *Principled BSDF*.

Esta configuración nodal es fundamental, ya que establece las relaciones físicas precisas entre las propiedades superficiales definidas por cada textura, transformando el conjunto de imágenes independientes en un material digital unificado, físicamente coherente y listo para ser aplicado a la geometría del modelo patrimonial (figura 5).

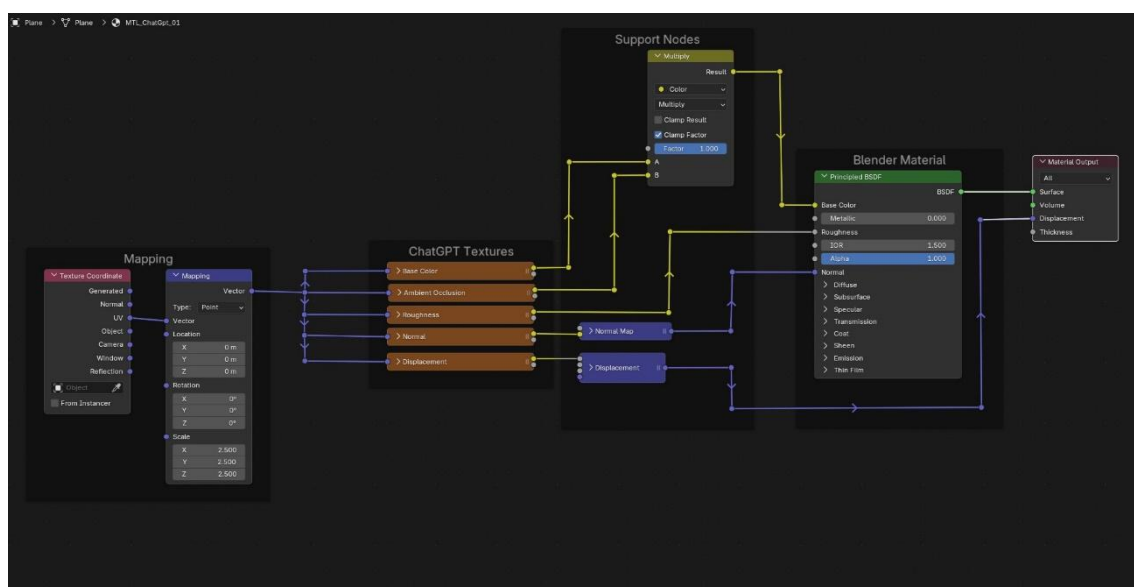


Figura 5. Configuración nodal de material en Blender.

Fuente: elaboración propia.

Captura del editor de nodos que muestra la conexión sistemática de los cinco mapas de textura generados (Figura 5) (*albedo*, *normal*, *roughness*, *height* y *ambient oclusión*) a sus correspondientes sockets de entrada en un shader Principled BSDF. Esta configuración establece las relaciones físicas entre las propiedades superficiales, transformando las imágenes independientes en un material digital unificado y listo para su aplicación en el modelo 3D patrimonial.

Tras la creación del material y su correcta configuración en el editor de nodos, se procedió a una fase de validación preliminar asignándolo a geometrías de prueba primitivas –un plano, un cubo y un cilindro–. Este paso permitió verificar *in situ* el comportamiento físico del material bajo diferentes orientaciones superficiales y condiciones de iluminación, asegurando la coherencia de los mapas PBR y la ausencia de artefactos visuales antes de su aplicación definitiva al elemento ornamental histórico de la Iglesia de Santa María de Sar (figura 6).

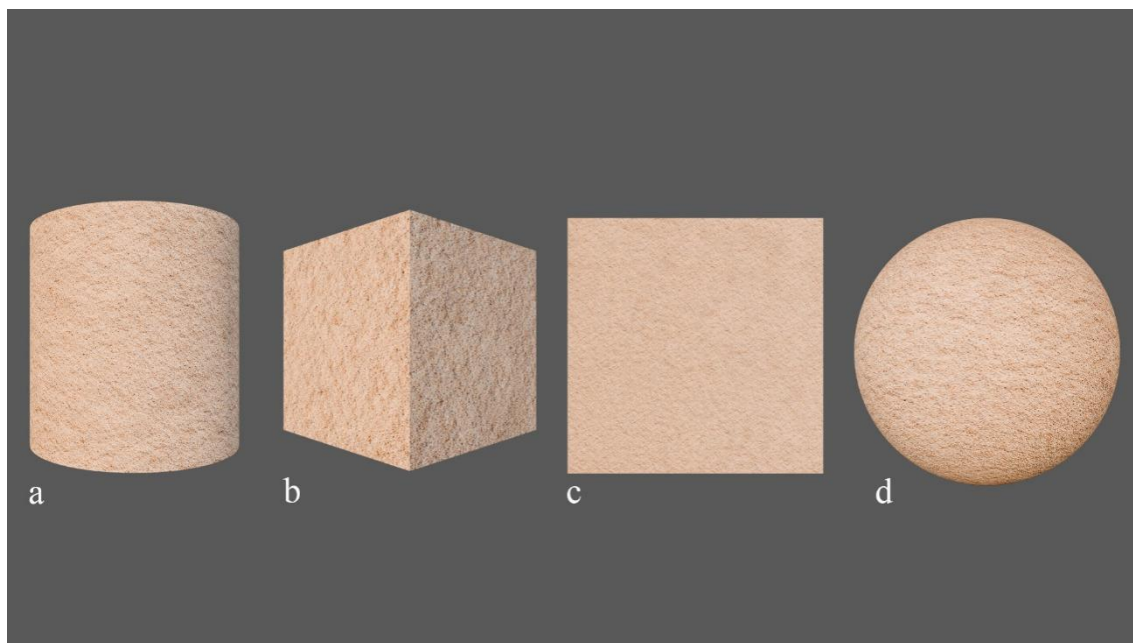


Figura 6. Validación preliminar en geometrías primitivas.

Fuente: elaboración propia.

La figura 6 muestra el render del material PBR final aplicado a modelos 3D básicos (cilindro, cubo, plano, esfera) para evaluar su comportamiento físico bajo diferentes orientaciones superficiales y condiciones de iluminación controlada. Esta etapa permitió verificar la coherencia de los mapas, la correcta proyección de las texturas y la respuesta visual unificada del material antes de su asignación al elemento patrimonial histórico.

Tras su comprobación preliminar en geometrías de prueba, se procedió a la validación visual final asignando el material a un elemento patrimonial específico: un capitel ornamentado ubicado en techo interior de la nave central de la Iglesia de Santa María de Sar. Para esta evaluación se empleó una iluminación HDRi de entorno, que simula condiciones lumínicas realistas y permite evaluar de manera integral la respuesta física del material su interacción con la luz, el comportamiento especular y la percepción del relieve, así como su coherencia visual dentro del contexto arquitectónico histórico para el cual fue concebido (Figura 7).

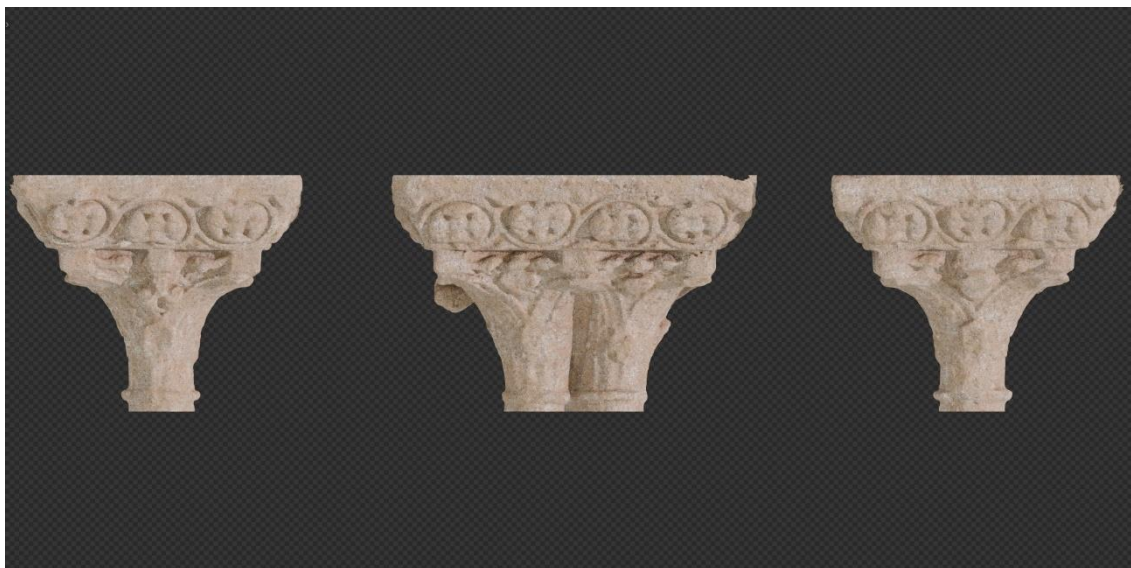


Figura 7. Validación final en contexto patrimonial.

Fuente: elaboración propia

La Figura 7 es un render a un capitel ornamentado del interior de la iglesia de Santa María de Sar con el material PBR aplicado. La evaluación se realizó bajo iluminación HDRI, lo que permitió analizar *in situ* la respuesta física del material, su interacción realista con la luz, el comportamiento especular y la percepción del relieve y su coherencia visual dentro del contexto arquitectónico histórico para el cual fue concebido.

La integración final del material sintetizado en el elemento patrimonial objetivo, junto con el conjunto completo de mapas PBR y su configuración técnica documentada, constituye el resultado tangible del flujo de trabajo propuesto. Estos resultados visuales y técnicos, sin embargo, abren una serie de interrogantes sobre la eficacia, las limitaciones y el significado metodológico del proceso llevado a cabo, aspectos que serán analizados críticamente en la siguiente sección de discusión.

DISCUSIÓN

La implementación exitosa del flujo de trabajo plantea una respuesta afirmativa, aunque matizada, a la pregunta de investigación sobre la viabilidad técnica y coherencia estética de integrar IA generativa en la producción de materiales PBR patrimoniales. La viabilidad técnica se demuestra no solo en la eficiencia temporal con la generación del albedo en minutos contrasta radicalmente con las horas o días de modelado manual subjetivo (24) o con el procesamiento complejo de la fotogrametría para limpiar texturas degradadas, sino en la perfecta integración del output sintético en un pipeline PBR industrial estándar.

Sin embargo, esta eficiencia conlleva una transferencia de la carga de trabajo: mientras métodos tradicionales como la fotogrametría aunque precisa, captura inevitablemente el deterioro actual, requiriendo horas o días de limpieza manual de texturas para

eliminar pátnas y alteraciones anacrónicas (16, 17, 19). Por su parte, el modelado manual permite mayor control creativo, pero su calidad depende críticamente de la habilidad subjetiva del artista digital, con tiempos de producción que pueden extenderse a varias jornadas por material (20, 21). En contraste, el método aquí propuesto desplaza el esfuerzo crítico desde la ejecución técnica hacia la fase de especificación histórica y *prompt engineering*, reduciendo la generación del albedo a minutos, aunque trasladando la pericia al dominio de la investigación histórica y la dirección del modelo de IA (23, 27).

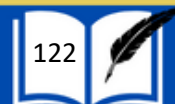
Así, la coherencia estética alcanza un nivel de plausibilidad histórica contextualizada, es decir, un criterio distinto al de calidad documental de métodos tradicionales. Pues, la fotogrametría brinda una representación con exactitud del estado actual de deterioro; por lo que, el modelado manual suele prometer a una recreación históricamente precisa que se limita por la habilidad subjetiva del creador y su interpretación.

Entonces, la IA guiada por referencias visuales específicas del sitio (Fig. 2) creó una textura que evocó contextualmente el material histórico para llenar un vacío entre lo existente y la hipótesis de lo perdido; pese a que esta capacidad haya estado estructuralmente limitada por la naturaleza estocástica y los sesgos de los modelos de difusión. Así, a diferencia de un escáner láser y/o una cámara métrica, DALL-E 3 que no mide ni suele replicar; se interpretó basándose en distribuciones estadísticas del conjunto de entrenamiento. Esto lo hace propenso a generar anomalías o texturas genéricas ("*average stone*") cuando las referencias son ambiguas o el *prompt* es impreciso, un riesgo inexistente en métodos de captura directa.

Estas limitaciones técnicas están intrínsecamente ligadas a implicaciones éticas profundas. El uso de IA generativa en patrimonio cultural reactiva debates clásicos sobre autenticidad y autoridad interpretativa (29). Un modelo entrenado predominantemente con datos de internet perpetúa y amplifica sesgos culturales y estéticos contemporáneos, pudiendo generar una visión anacrónica o occidentalizada de materiales históricos.

Por consiguiente, la transparencia (*paradata*) resulta un imperativo ético de que cualquier aplicación de este método deberá declarar específicamente la naturaleza sintética e/o interpretativa de las texturas al diferenciarlas de los datos de captura directos y/o documentados durante el proceso de *prompt engineering*, así como las referencias utilizadas. Lo que, causa la alineación con los principios de la London Charter (2009) (14) para evitar la creación de un patrimonio especulativo con la autoridad falsa de un documento histórico.

Las implicaciones prácticas son duales porque, por un lado, esta tecnología democratiza parcialmente el origen de materiales de alta fidelidad, ya que permiten a equipos con menos recursos especializados en arte digital a crear prototipos visuales para estudios de viabilidad con propuestas de financiamiento y/o experiencias educativas. Así, por otro lado, se origina una nueva dependencia de plataformas y modelos comerciales cuyos algoritmos, costos y condiciones de uso suelen ser cambiantes arbitrariamente con la vulnerabilidad de que no afecta los métodos tradicionales con base en software de código abierto y/o técnicas fotogramétricas autónomas.



El futuro de esta línea de trabajo debería centrarse solo en desarrollar modelos de dominio específico entrenados con corpus patrimoniales curados éticamente, y en la integración de la IA híbridamente; por ejemplo, al usar la fotogrametría para proporcionar la geometría y la estructura macrotextual, y al utilizar la IA para inferir y sintetizar la micro-textura y los colores originales perdidos. De esta manera, la IA no reemplazaría las metodologías, sino que se integraría para superar sus respectivas limitaciones bajo un marco de transparencia y rigor crítico para el investigador y/o creador, y no al algoritmo como una autoridad en la interpretación del pasado.

CONCLUSIONES

Este estudio desarrolló y validó un flujo de trabajo operativo que integró la síntesis de IA en la producción de materiales PBR para la visualización patrimonial histórica. Los resultados demostraron que, bajo un marco de especificación histórica y *prompt engineering* precisos, es posible crear materiales digitales con una plausibilidad estético-histórica correctos para contextos de divulgación, estudios preliminares y/o hipótesis de restitución.

La principal respuesta a la pregunta de investigación fue afirmativa porque la integración de IA generativa en este pipeline fue viable técnicamente y, estéticamente, coherente, aunque su valor no haya radicado en la automatización, sino en la formalización de un nuevo proceso de traducción.

Así, el método lo convirtió en el conocimiento experto y, en un protocolo replicable de historia que, puede dirigir a la generación futura y sintética hacia un objetivo patrimonial concreto al superar la mera generación aleatoria.

No obstante, como evidencia, queda esta capacidad que no sustituye la evidencia material ni la captura directa; por el contrario, reconfiguró el rol del investigador y/o creador en su papel de ejecutor manual a director de IA porque su autoridad crítica se ejerció en la fase de especificación y validación, no en la de ejecución.

Por ello, la contribución última de este trabajo trascendió como el resultado técnico específico al ofrecer un modelo metodológicamente transparente que documentó paso a paso su adaptabilidad y mejoramiento por la comunidad. Es entonces que, plantea y, además realiza una pregunta fundamental para el futuro de la humanidad digital: ¿cómo se diseñarán las herramientas de IA que no, únicamente, aceleren procesos, sino que amplifiquen y formalicen el rigor interpretativo del especialista?

Por ello, se recomienda que futuras investigaciones exploren (1) el desarrollo de *prompts* estandarizados para las categorías de materiales patrimoniales históricos, la (2) integración híbrida con datos de fotogrametría para guiar la síntesis geométricamente, y la (3) creación de modelos de dominio específicos entrenados con corpus patrimoniales curados.

Porque solo de esta manera la IA dejará de representar una caja negra creativa unitaria y se convertirá en un instrumento crítico, analítico, reproducible y ético que estará a favor del servicio de la interpretación y comunicación del patrimonio histórico digital.

En definitiva, esta investigación se presenta como herramienta complementaria de un kit digital para el especialista en patrimonio histórico porque válida contextos donde el balance entre eficiencia, plausibilidad histórica y transparencia metodológica el espacio es explícito y éticamente gestionado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Fundación Catedral de Santiago de Compostela por facilitar el acceso a sus instalaciones y bienes patrimoniales, cuya colaboración fue fundamental para la realización de este estudio. Asimismo, extienden un especial reconocimiento a la Doctora Ana Laura Gómez por su valiosa asistencia técnica en la revisión del manuscrito, y al Doctor Alfonso Vázquez por su orientación y recomendaciones técnicas, que contribuyeron significativamente al desarrollo y mejora de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Storeide MB, George S, Sole A, et al. Standardization of digitized heritage: A review of implementations of 3D in cultural heritage. *Herit Sci*. 2023;11:249. doi: 10.1186/s40494-023-01079-z.
2. Markiewicz J, Kot P, Georgopoulos A, et al. Transforming architectural heritage documentation: Developing integrated European recommendations for safeguarding and preservation. *npj Herit Sci*. 2025;13:622. doi: 10.1038/s40494-025-02200-0.
3. Lang M, Salcedo Paparoni V. Scanning authenticity: On the limits of 3D representation in museums. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2025; X-M-2-2025:193-199. DOI: 10.5194/isprs-annals-X-M-2-2025-193-2025.
4. Wu L, Yu R, Su W, Ye S. Design and implementation of a metaverse platform for traditional culture: The chime bells of Marquis Yi of Zeng. *Herit Sci*. 2022;10:193. doi: 10.1186/s40494-022-00828-w.
5. Alshawabkeh Y, Baik A. Integration of photogrammetry and laser scanning for enhancing scan-to-HBIM modeling of Al Ula heritage site. *Herit Sci*. 2023;11:147. doi: 10.1186/s40494-023-00997-2.
6. Stamnas A, Kaimaris D, Georgiadis C, Patias P. Comparing 3D digital technologies for archaeological fieldwork documentation: The case of Thessaloniki Toumba excavation, Greece. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2021;XLVI-M-1-2021:713-720. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-713-2021.
7. Llabani A, Abazaj F. 3D documentation of cultural heritage using terrestrial laser scanning. *J Appl Eng Sci*. 2024;22(2):267-271. doi: 10.5937/jaes0-50414.
8. Sanmartín P, Sanjurjo-Sánchez J, Prieto B. Covering layers on granite buildings of Northwestern Iberian Peninsula: When observable characteristics and lab characterization do not match. *Coatings*. 2020;10(2):137. doi: 10.3390/coatings10020137.



9. Mishra M, Lourenço PB. Artificial intelligence-assisted visual inspection for cultural heritage: State-of-the-art review. *J Cult Herit.* 2024;66:536-550. doi: 10.1016/j.culher.2024.01.005.
10. Jáidar Benavides Y, Magar Meurs V, Ruiz Martín MC, editors. *Criterios de conservación del patrimonio en piedra*. México: Secretaría de Cultura / INAH / UNAM-IE / ICCROM; 2025. Disponible en: <https://www.iccrom.org/es/publication/criterios-de-conservaci%C3%B3n-del-patrimonio-en-piedra>
11. Pietroni E, Ferdani D. Virtual restoration and virtual reconstruction in cultural heritage: Terminology, methodologies, visual representation techniques and cognitive models. *Information.* 2021;12(4):167. doi: 10.3390/info12040167.
12. Apollonio FI. The three-dimensional model as a "scientific fact": The scientific methodology in hypothetical reconstruction. *Heritage.* 2024;7(10):5413-5427. doi: 10.3390/heritage7100255.
13. Fallavollita F, Foschi R, Apollonio FI, Cazzaro I. Terminological study for scientific hypothetical 3D reconstruction. *Heritage.* 2024;7(9):4755-4767. doi: 10.3390/heritage7090225.
14. The London Charter. The London Charter for the computer-based visualisation of cultural heritage. Version 2.1. 2009. Disponible en: https://londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en_edits.pdf
15. The Seville Principles. The Seville Principles: International principles of virtual archaeology. 2017. Disponible en: <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/06/Seville-Principles-IN-ES-FR.pdf>
16. Xing Y, et al. A scoping review of photogrammetry in cultural building heritage. *Electronics.* 2025;14(18):3666. doi: 10.3390/electronics14183666.
17. Brůha L, et al. Reconstruction of lost cultural heritage sites and landscapes: Context of ancient objects in time and space. *ISPRS Int J Geo-Inf.* 2020;9(10):604. doi: 10.3390/ijgi9100604.
18. De Fino M, Galantucci RA, Fatiguso F. Condition assessment of heritage buildings via photogrammetry: A scoping review from the perspective of decision makers. *Heritage.* 2023;6(11):7031-7066. doi: 10.3390/heritage6110367.
19. Vico-García D, Mozas-Calvache AT, et al. Proposal of radiometric correction for the in-situ modelling of polychrome religious carvings. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.* 2025;XLVIII-M-9-2025:1563-1568. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-1563-2025.
20. González ER. La reconstrucción virtual aplicada al patrimonio como herramienta para la investigación y la divulgación: El ejemplo del sacrificio ritual del patio del yacimiento de Casas del Turuñuelo (Guareña, Badajoz, España). *Cuad Prehist Arqueol Univ Granada.* 2024;34:85-114.
21. Chen Y, Nie Y, Ummenhofer B, Birkel R, Paulitsch M, Nießner M. PBR-SR: Mesh PBR texture super resolution from 2D image priors. *arXiv.* 2025. doi: 10.48550/arXiv.2506.02846.
22. Spennemann DHR. Generative artificial intelligence, human agency and the future of cultural heritage. *Heritage.* 2024;7(7):3597-3609. doi: 10.3390/heritage7070170.

23. Rombach R, Blattmann A, Lorenz D, Esser P, Ommer B. High-resolution image synthesis with latent diffusion models. En: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. p. 10684-10695. doi: 10.1109/CVPR52688.2022.01042.
24. Witte J, Lee E, Brausem L, Shillabeer V, Bonacchi C. Generative AI in heritage practice: Improving the accessibility of heritage guidance. *Heritage*. 2025;8(12):513. doi: 10.3390/heritage8120513.
25. Xu J, Yan L, Zhang R, Zhou M. A review of the development and application of generative technology in digital museums. *npj Herit Sci*. 2025;13(1):589. doi: 10.1038/s40494-025-02164-1.
26. Chen G, Tong Y, Wu Y, Wu Y, Liu Z, Huang J. Reconstruction of cultural heritage in virtual space following disasters. *Buildings*. 2025;15(12):2040. doi: 10.3390/buildings15122040.
27. Bender EM, Gebru T, McMillan-Major A, Shmitchell S. On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? En: Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '21). 2021. p. 610-623. doi: 10.1145/3442188.3445922.
28. Pineau J, Vincent-Lamarre P, Sinha K, Larivière V, Beygelzimer A, d'Alché-Buc F, Fox E, Larochelle H. Improving reproducibility in machine learning research: A report from the NeurIPS 2019 reproducibility program. *arXiv*. 2020. doi: 10.48550/arXiv.2003.12206.
29. Champion EM, editor. *Virtual heritage: A guide*. London: Ubiquity Press; 2021.
30. Pescarin S, Cerato I, Ciortan IM, Città G, Clay A, Spotti S, Sotiropoulou S, Trumpy G. Authenticity in the design of digital heritage applications. En: *Chromatic Visions. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 15750. Cham: Springer; 2025. p. 81-127. doi: 10.1007/978-3-032-07792-9_3.
31. Pansoni S, Tiribelli S, Paolanti M, Di Stefano F, Frontoni E, Malinverni ES, Giovanola B. Artificial intelligence and cultural heritage: Design and assessment of an ethical framework. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*. 2023; XLVIII-M-2-2023:1149-1155. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1149-2023.
32. Tiribelli S, Pansoni S, Frontoni E, Giovanola B. Ethics of artificial intelligence for cultural heritage: Opportunities and challenges. *IEEE Trans Technol Soc*. 2024;5(3):293-305. doi: 10.1109/TTS.2024.3432407.
33. Creswell JW, Poth CN. *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. 4th ed. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2018.
34. Münster S, Apollonio FI, Bluemel I, Fallavollita F, Foschi R, Grellert M, Ioannides M, Jahn PH, Kurdiovsky R, Kuroczyński P, Lutteroth JE, Messemer H, Schelbert G. Scholarly method. En: *Handbook of digital 3D reconstruction of historical architecture*. Cham: Springer; 2024. p. 41-64. doi: 10.1007/978-3-031-43363-4_3.
35. McKenney S, Reeves TC. *Conducting educational design research*. 2nd ed. London: Routledge; 2019. doi: 10.4324/9781315105642.

