

Proceso de reconstrucción virtual del patrimonio urbano y arquitectónico

Autor/es:

Arq. Mauricio Toro Mukled

Email

toro.mauricio@usfx.bo

Filiación:

Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Facultad de Arquitectura y Ciencias del Hábitat, Carrera de Arte y Diseño Gráfico.

Introducción

Durante muchos años las maquetas físicas fueron un recurso para la representación tridimensional utilizada con diferentes propósitos, en la actualidad la evolución de las nuevas tecnologías permiten la creación de maquetas tridimensionales virtuales ya sea a partir de la digitalización 3D con escáner láser o mediante el modelado directo en el ordenador. (Alfaro Rodríguez, 2018).

Las reconstrucciones digitales en tres dimensiones están adquiriendo importancia y relevancia desde el punto de vista científico y académico para analizar, validar hipótesis y presentar resultados de investigación reduciendo tiempos de trabajo e incrementando las posibilidades de interacción con el modelo y estudios posteriores del mismo; de la misma manera, la documentación utilizada para la creación de la reconstrucción aporta al conocimiento del objeto reconstruido. (Münster , Sander et al., 2024)

El término de Reconstrucción virtual se define claramente en los Principios de Sevilla (ICOMOS, 2017) que dice:

comprende el intento de recuperación visual, a partir de un modelo virtual, en un momento determinado de una construcción u objeto fabricado por el ser humano en el pasado a partir de las evidencias físicas existentes sobre dicha construcción u objeto, las inferencias comparativas científicamente razonables y en general todos los estudios llevados a cabo por los arqueólogos y demás expertos vinculados con el patrimonio arqueológico y la ciencia histórica.

La reconstrucción virtual se constituye en un medio para la transferencia de conocimiento que apoya la historia, el recuerdo cultural y promueve la sensibilización con el patrimonio, reforzando la memoria colectiva para su preservación.

Es importante diferenciar entre los términos de “restauración virtual” y “reconstrucción virtual”. De acuerdo a varios autores, la restauración virtual se basa en reorganizar restos materiales existentes de una estructura histórica en un modelo digital que representa el posible procedimiento de restauración física . La reconstrucción virtual genera un modelo digital de restos o estructuras inexistentes basados en diversos tipos de datos que son analizados, interpretados y representados generalmente de forma tridimensional, siendo importante que el proceso previo a la modelación tenga rigor científico en el procedimiento para no caer en una visualización de un simple carácter estético.(Al shawabkeh & Arar, 2024; ICOMOS, 2017)

El incremento en la capacidad de los equipos de computación así como los programas para el manejo

tridimensional permite que la reconstrucción virtual sea un recurso más accesible para preservar y entender el patrimonio edificado, y como menciona Trushaj (Trushaj & Xhelaj, 2024) las tecnologías modernas en arqueología y restauración de la arquitectura son importantes para preservar y entender la historia. En el año 2009 en la Carta de Londres (The London Charter, 2009) se reconoce que la visualización computarizada está aumentando continuamente sus posibilidades y que la misma puede ser utilizada para diferentes tipos de investigación; por lo que en este documento se propone una serie de principios o criterios básicos para el proceso de reconstrucción y visualización digital en investigación y divulgación del patrimonio cultural.

Hace muchos años se acepta el hecho que los gráficos por computadora son un recurso para recrear el patrimonio cultural perdido mediante imágenes y recorridos virtuales que permiten valorar e investigar un modelo de mejor manera que otras técnicas. (Masuch et al., 1999)

Actualmente se destaca el potencial de la tecnología para el modelado tridimensional e incluso para la impresión 3D del mismo, como medio para la educación y valoración de la cultura de los sitios y monumentos; también los modelos son utilizados para la investigación científica. (Boccardi, Giovanni & Evers, Léonie, 2018)

Si bien en los últimos años se ha dado un incremento significativo en la reconstrucción virtual del patrimonio arquitectónico y urbano, las publicaciones en su mayoría se han centrado en la investigación específica de cada proyecto y no en un procedimiento general que guíe el proceso. (Mascio et al., 2016) El objetivo del presente trabajo se centra en la revisión de los documentos y procesos existentes referidos a la reconstrucción virtual de obras arquitectónicas o espacios urbanos en ruinas o destruidos para proponer a partir de esto un criterio para analizar y sistematizar métodos o procedimientos para futuras aplicaciones en este campo.

Métodos

La presente investigación se enmarca en un enfoque cualitativo interpretando los diferentes elementos importantes en la reconstrucción virtual del patrimonio y las diversas metodologías planteadas. El diseño adoptado es de tipo no experimental, descriptivo e interpretativo.

Mediante el método histórico y documental se realizó la revisión sistemática de trabajos de investigación sobre la reconstrucción virtual generada por investigadores, profesionales, académicos, instituciones u organizaciones para identificar, analizar y sintetizar conceptos básicos así como elementos importantes que deben considerarse para la modelación tridimensional y difusión de edificios o espacios urbanos inexistentes, en ruinas o transformados.

Se identificaron aspectos sobre el tipo de fuentes de información y su aplicación, los procedimientos para el tratamiento de datos faltantes y su aplicación en el modelo, las características de la visualización para la difusión, y los elementos que deben considerarse para que la reconstrucción tenga una base científica más que solo de visualización.

Se analizaron diversas propuestas de métodos planteadas por diversos autores para realizar el proceso de reconstrucción virtual, las etapas involucradas y las características de cada una de ellas.

La información anterior permitió con el método proyectual elaborar una propuesta base de los procedimientos y consideraciones a tomar en cuenta en la reconstrucción virtual del patrimonio, así como las variaciones que podrían darse en base al tipo de reconstrucción, la escala o nivel de detalle del modelado y el tipo de difusión de los resultados.

Resultados

Consideraciones sobre la reconstrucción virtual

La reconstrucción virtual del patrimonio se ha convertido en una herramienta de investigación en la arquitectura y arqueología con gran crecimiento y aplicación en los últimos años, incrementando también la necesidad de que la misma cumpla algunos criterios básicos de rigor científico y el resultado no sea una simple visualización ideal o abstracta del objeto modelado.

A continuación se presentan algunos elementos básicos, que de acuerdo a diferentes fuentes, deben ser considerados en la reconstrucción virtual del patrimonio.

La Carta de Londres (The London Charter, 2009) recomienda que deben llevarse a cabo evaluaciones sobre la idoneidad de los métodos utilizados para la visualización computarizada de acuerdo al objeto que se pretende alcanzar en la investigación y cuál es la forma de visualización más apropiada, ya sea esta esquemática o fotorrealista, el nivel de detalle, estática o interactiva. Por su parte en los Principios de Sevilla (ICOMOS, 2017) se definen tres categorías que son la investigación, conservación y/o interpretación; y se recomienda que en la reconstrucción virtual debe quedar claro qué es auténtico y que no, explicando explícitamente los niveles de veracidad en la que se sustenta la reconstrucción.

En general las reconstrucciones virtuales se enfrentan al reto de información faltante o de baja calidad como imágenes en las que no son claras características particulares del objeto a reconstruir, lo que obliga a completar dicha información, misma que debe estar debidamente documentada para hacer que los resultados sean comprensibles y puedan ser científicamente reproducibles. (Münster, Sander et al., 2024)

El transmitir conocimiento depende de factores como el formato, exactitud, argumentación, comunicación entre otros; y el valor del resultado final está en la validación y accesibilidad de los datos, la transparencia del proceso de interpretación y codificación, y cómo hacer la difusión (Vico López, 2011). La importancia del modelo virtual para propósitos investigativos está en la información que contiene más que en las herramientas utilizadas para generar el mismo (Forte, 2008); en ese sentido, la visualización de un modelo digital no es solo una simple representación, sino una nueva forma de reproducción y análisis de conocimiento. (Sullivan & Snyder, 2017)

Para Alfaro Rodriguez (2018), es importante definir de inicio cual es el propósito del proyecto y enfocarse en este durante todo el proceso de reconstrucción virtual, dejando claramente establecido que se basa en fuentes reales y que es producto de una hipótesis.

Piquer menciona que una reconstrucción virtual puede darse tomando en cuenta dos tipologías de intervención, la primera basada en la existencia física de ruinas o restos arqueológicos que sirvan de partida, y la segunda cuando se presenta la inaccesibilidad de las ruinas por estar enterradas o por ya no existir. En el segundo caso, la reconstrucción puede ser más conceptual y abstracta al no permitir la comparación con referentes físicos y la definición del modelo puede generarse a partir de interacciones sucesivas para verificar su validez (Piquer-Cases et al., 2015).

Entre las aplicaciones que se han dado a la digitalización 3D del patrimonio cultural están: Constituir un documento gráfico, convertirse en una herramienta de difusión y análisis de aspectos que de otra manera serían inaccesibles, ser base para la realización de maquetas de gran fidelidad, ser una herramienta de análisis, servir como base para la restauración, generar documentación asociada al modelo (Torres et al., 2010); estas aplicaciones dirigidas principalmente a patrimonio existente o en ruinas, son aplicables a reconstrucción digital de patrimonio inexistente o transformado.

Características de las fuentes utilizadas en la reconstrucción virtual:

En la etapa de investigación preliminar de obtención de información para la reconstrucción virtual pueden distinguirse varias fases “recopilación de datos de archivo, la recopilación gráfica de planimetrías que proporcione las dimensiones, geometría y forma según una representación basada en la proyección ortogonal, y la recopilación de imágenes que reproduzcan el edificio procedentes de la pintura, el dibujo o el grabado” (Piquer-Cases et al., 2015). Para la historia de la arquitectura y para la reconstrucción virtual, las fuentes de información son la base principal para encarar cualquier estudio o proyecto; estas fuentes pueden ser tangibles ya sea en textos, gráficos o imágenes, o intangibles como el relato oral histórico. (Münster , Sander et al., 2024)

Si se toma en cuenta fuentes literarias o artísticas, se debe considerar que en las fuentes literarias pueden

existir documentos oficiales, correspondencia o crónicas de viajeros que describen características urbanas o arquitectónicas de un edificio. Entre las fuentes artísticas se pueden considerar pinturas, mosaicos, frescos, esculturas y otras en la que los artistas representaban el espacio; se debe considerar que estas representaciones no son siempre precisas porque interviene en ellas la percepción e interpretación del autor, aunque sí pueden brindar pistas sobre proporciones y apariencia de edificios o entornos urbanos.

Es importante que la documentación utilizada para la reconstrucción virtual permita el análisis y comparaciones rigurosas de la misma, y se divulguen todas las fuentes utilizadas en la investigación; así mismo, debe quedar claro y debidamente documentado todas las decisiones tomadas en la reconstrucción virtual ya sean estas analíticas, deductivas, interpretativas o creativas para que el resultado pueda ser comprendido claramente. (The London Charter, 2009)

Es posible también realizar estudios comparativos de edificios similares tomando en cuenta el estilo arquitectónico o tipológico, el sistema de proporciones, o criterios de distribución espacial. Los mismos deben estar debidamente documentados y registrados en el proceso de generación del modelo.

Las características de las fuentes utilizadas en la reconstrucción virtual pueden ser representadas también en la etapa de difusión indicando la “escala de evidencia” mediante la utilización de colores codificados de acuerdo a lo propuesto por Aparicio y Figueiredo (Aparicio Resco & Figueiredo, 2017) en base al proyecto Byzantium 1200, esta forma de demostrar gráficamente el origen y exactitud de las fuentes se puede apreciar con mayor frecuencia en las reconstrucciones virtuales.

Tipo de representación del modelado

La calidad de la reconstrucción virtual y su valor de investigación científica se medirá respecto a la rigurosidad en la elaboración de la imagen y no únicamente en su vistosidad. (ICOMOS, 2017)

De acuerdo a Masuch (1999) los investigadores se encuentran ante el problema de que solo podrían representar modelos o información de edificios que tienen vestigios físicos comprobables, pero es también importante la reconstrucción de obras arquitectónicas que no cumplen ese requisito y la visualización de la reconstrucción debe ser lo más realista posible, y afirma “Simplemente omitir detalles, como puertas, es tan incorrecto como representar objetos que no han sido excavados. Por lo tanto, los investigadores tienen que extrapolar los datos faltantes para poder transmitir una visualización integral del sitio reconstruido.”, asumiendo que las hipótesis de reconstrucción en base a un sustento de investigación científica pueden considerarse válidas.

Existe una diversidad de criterios sobre la forma en la que deberían mostrarse y difundirse los modelos o imágenes de la reconstrucción virtual que se presentan de forma resumida a continuación.

Representaciones conceptuales

Para Piquer la reconstrucción virtual generada debe ser conceptual para no crear una recreación idealizada y fantástica que se aleje de una interpretación científico-metodológica (Piquer-Cases et al., 2015).

En estructuras que no cuentan con imágenes o evidencia física de cómo fueron, presentan la dificultad de no poder demostrar en términos científicos la veracidad de una imagen fotorrealista, por lo que los investigadores prefieren el uso de imágenes conceptuales de líneas que permitan la discusión de los expertos y las posibles variantes del modelo. (Masuch et al., 1999)

Visualización foto realista

Las imágenes fotorrealistas tienen la capacidad de permitir una mejor comprensión de la estructura o sitio representado (Alshawabkeh & Arar, 2024; Masuch et al., 1999); para generar este tipo de visualización se requiere un mayor esfuerzo para lograr materiales y un entorno real, pero con la capacidad de los equipos y programas actuales el proceso es más fluido.

Realidad virtual

Con el avance en la capacidad y velocidad de los equipos de computación y el desarrollo de nuevas programas principalmente de juegos para la realidad virtual y la interacción, el navegar explorando edificios y contextos en un entorno de realidad virtual se convierte en un recurso posible no solo para la difusión general sino como un instrumento para analizar hipótesis de reconstrucción virtual.(Mascio et al., 2016)

Si bien existen diversas opiniones sobre el tipo de visualización que deberían tener los modelos ya sean fotorrealistas o no, ambos presentan aspectos positivos dependiendo del objetivo de la investigación y el público al que va dirigido. Los modelos fotorrealistas pueden presentar alguna dificultad en documentar las inferencias y decisiones durante el modelado, es por esto que el no fotorrealismo no se ha dejado de lado y más bien sirve como fuente técnica del modelo (Huivila, 2021). La tendencia por lo mencionado es de que los diferentes tipos de representación no son excluyentes sino complementarios (Roussou & Drettakis, 2003) y lo importante es considerar cuáles son los medios efectivos para que los espectadores en la difusión comprendan las certezas o incertidumbres de todo el proceso de reconstrucción virtual.

Métodos de reconstrucción

En el libro de “Manual de Reconstrucción Digital 3D de Arquitectura Histórica” (Münster , Sander et al., 2024), se identifican dos tipos de modelos que se pueden generar tomando en cuenta la base para su

modelado, el primero es el Modelo sin Procesar que se basa en la captura de datos automática de objetos existentes por medio de escaneo láser o fotogrametría generando una nube de puntos tridimensionales, donde la exactitud de la información obtenida está directamente relacionada a los procedimientos de escaneo y las herramientas utilizadas; el segundo se refiere al Modelo Informativo que está construido en base a inferencias generadas a partir de diversos tipos de datos pudiendo interpretarse conceptualmente como una ingeniería inversa donde se reconstruye el modelo tridimensional inclusive en algunos casos con información faltante. Puede también darse el caso que a partir de un Modelo sin Procesar se genera un Modelo Informativo. Otro elemento importante mencionado que facilita el proceso de reconstrucción es el de la segmentación u organización semántica de datos que consiste en subdividir y estructurar lógicamente la información por grupos de acuerdo al tipo de elementos o similitudes principalmente de tipo arquitectónico como ser puertas, ventanas, columnas u otro tipo de elementos similares, esta organización facilita el tiempo de reconstrucción virtual ya que un mismo objeto puede ser utilizado varias veces en el modelo; la organización puede también estar basada en un nivel jerárquico de niveles y sus objetos correspondientes.

En el Gráfico 1 se muestra un esquema sobre el proceso de reconstrucción del “Manual de Reconstrucción Digital 3D de Arquitectura Histórica” (Münster, Sander et al., 2024) donde se puede notar que un primer elemento importante a tomar en cuenta es la existencia o no del objeto a modelar, en segundo lugar está el proceso de modelación tridimensional donde se genera un proceso de retroalimentación de la nueva información con las fuentes utilizadas como base para el modelado; y finalmente la creación de la visualización final de acuerdo a los propósitos de la investigación y el nivel de detalle del modelo reconstruido.

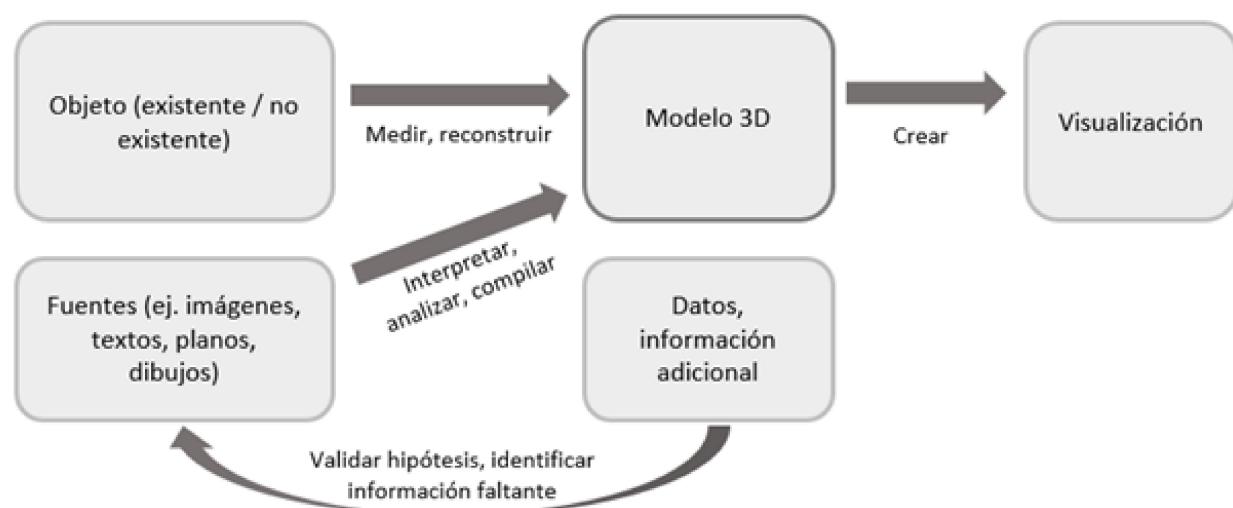


Gráfico 1: Propósitos del modelado 3D en el proceso de reconstrucción. (Münster , Sander et al., 2024)

Para Piquer (2015) un método para la modelación digital en la investigación patrimonial debe partir de los procedimientos arquitectónicos utilizados con el mismo fin; resaltando que el propósito del modelo no es experimental sino de investigación. El método para la reconstrucción virtual del patrimonio debe articular los datos históricos con la investigación científica. Considerando lo mencionado anteriormente, Piquer plantea una serie de pasos a seguir que son representados esquemáticamente en el Gráfico 2, donde los datos y referentes históricos son la base para plantear las hipótesis de investigación que guiarán en la reconstrucción virtual para posteriormente crear la presentación del modelo 3D y su posterior difusión. La generación del modelo digital está sujeto a la retroalimentación de aspectos morfológicos en interacción con la formulación de hipótesis.



Gráfico 2: Interpretación esquemática del método planteado por Piquer (Piquer-Cases et al., 2015)

Mascio (Mascio et al., 2016) propone tomar en cuenta tres aspectos principales e importantes sobre la reconstrucción virtual: Qué, Porqué y Cómo (Gráfico 3). El “qué” se refiere a que es lo que se quiere modelar considerando el tipo de edificio a reconstruir que puede estar en las categorías de parcialmente destruido, totalmente destruido y transformado; en base a estas categorías es necesario definir la metodología a aplicar. El “porqué” se refiere al propósito de la reconstrucción digital que determina los métodos y las disciplinas involucradas; en el caso de que la reconstrucción virtual pueda terminar en la reconstrucción de un edificio derrumbado por diversas circunstancias, tendrá que incluir un proceso arquitectónico que tenga resultados técnicos y constructivos con ese fin; para el caso de ser una reconstrucción histórica virtual o gráfica puede no requerir la elaboración de planos técnicos. El “cómo” tiene relación con la etapa anterior de “porqué” para definir aspectos determinantes en la

reconstrucción virtual y consta de cuatro pasos que son: Recolección y análisis de datos, Reconstrucción digital 3D, Aplicaciones futuras del modelo 3D reconstruido, Difusión; este último paso es el destinado al producto final. Todo el proceso investigativo está influenciado por el área disciplinaria al que va dirigido.



Gráfico 3: Pasos principales del proceso de reconstrucción. (Mascio et al., 2016)

Las metodologías de reconstrucción virtual en general son similares, pudiendo variar ligeramente dependiendo de factores como el objeto representado, estado de preservación, existencia de restos, fuentes y datos disponibles entre otros aspectos. El proceso de investigación puede aportar descubriendo aspectos no identificados o vacíos de información que se hacen evidentes con el modelado, incidiendo en posibles cambios de la hipótesis inicial. (Valle Abad et al., 2022)

Para Al shawabkeh y Arar, la investigación sobre la reconstrucción virtual sigue de forma general una metodología estandarizada que comprende cuatro pasos importantes que son la encuesta, la documentación, el procesamiento de datos, y la creación de hipótesis reconstructivas en 2D o 3D. (Al shawabkeh & Arar, 2024)

Dependiendo del tipo de reconstrucción virtual que se pretende hacer la escala y el propósito de investigación o difusión, puede requerir no solamente el modelado del edificio, sino también del entorno o paisaje en el cual se encontraba; brindando de esa manera el contexto histórico completo en el entendido de que el paisaje circundante también es dinámico y cambiante.

En general para el modelado del paisaje se toman en cuenta seis aspectos básicos que son: forma y relieve, vegetación, agua, estructuras arquitectónicas y de infraestructura, animales y personas, y la atmósfera que comprende sol, viento, etc. (Brúha et al., 2020). Es importante en este aspecto considerar los diferentes niveles de detalle en la visualización optimizando tiempos de modelado así como capacidad y uso de los computadores.

Según Rodriguez (2012) los modelos virtuales deben conceptualizarse como un verdadero proyecto arquitectónico de carácter no lineal que debe estar documentado en todas sus etapas, y a medida que se alcanza mayor nivel de precisión y se obtienen nuevas evidencias en el avance de la reconstrucción, se van generando iteraciones o retroalimentaciones al proceso de modelado. Rodriguez (2012) en “La reconstrucción histórica virtual de la Plaza Mayor de Mérida, Yucatán” plantea una metodología de tres ciclos o etapas (Gráfico 4) en la que se pueden identificar varios elementos comunes a las anteriores metodologías mencionadas pero con mayor detalle en algunos aspectos como el grado de precisión o detalle del modelo a realizar, selección de las herramientas digitales para la reconstrucción, definición de texturas y materiales a utilizarse en el modelo virtual, la iluminación del modelo representado dependiendo de su ubicación geográfica, y el desarrollo de elementos contextuales y ambientación que apoyen la percepción del modelo en su entorno, siendo este último aspecto mencionado también en los Principios de Sevilla (ICOMOS, 2017).

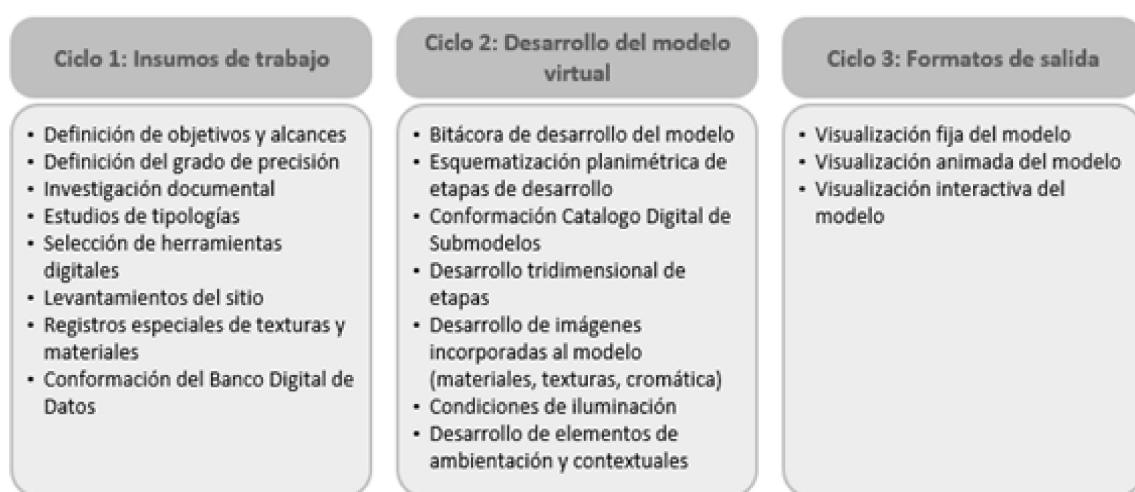


Gráfico 4: Esquema resumen de la metodología planteada por Rodriguez (Rodríguez, 2012)

Giovannini (2018) plantea cuatro pasos para el proceso de reconstrucción virtual. Recopilación y adquisición de datos: Datos físicos que pueden ser obtenidos de tres categorías macro

(imágenes, evidencias arqueológicas o arquitectónicas, documentos de texto). Análisis de datos: Análisis y transcripción de los datos obtenidos de la que se puede obtener información morfológica, medidas, estructuras semánticas. Interpretación de datos: Consiste en que los datos se transformen en evidencia para la reconstrucción virtual. Representación de datos: Muestra la reconstrucción virtual permitiendo entender e interpretar los datos.

Alfaro Rodríguez (2018) enfatiza que cada reconstrucción virtual es diferente y la metodología debe adaptarse para cada caso; pero plantea los siguientes pasos como base a utilizar en cualquier reconstrucción virtual: Búsqueda de información, Tratamiento digital y procesado de la documentación, Análisis de los sistemas de representación y divulgación, Generación del modelo 3D, Generación de texturas, Aplicación de iluminación y vistas, Renderizado y postproducción.

Propuesta metodológica para la reconstrucción virtual

En base a los resultados obtenidos sobre la reconstrucción virtual del patrimonio, a continuación se plantean algunos criterios básicos que puedan guiar en este tipo de investigación y como menciona Rodriguez (2012) la metodología no puede tomarse como una receta aplicable a todos los casos de estudio, siendo en última instancia el investigador el que determine las partes que intervienen en la reconstrucción dependiendo de la característica de la misma, los datos disponibles y el tipo de edificación o entorno urbano.

Es importante tomar en cuenta que el proceso previo de la modelación virtual de recolección y análisis de datos se constituye en un aporte investigativo al objeto estudiado cuando es registrado correctamente.

En el gráfico Gráfico 5 se presenta la propuesta general del proceso de reconstrucción virtual del patrimonio urbano y arquitectónico compuesto de siete componentes o etapas descritas a continuación

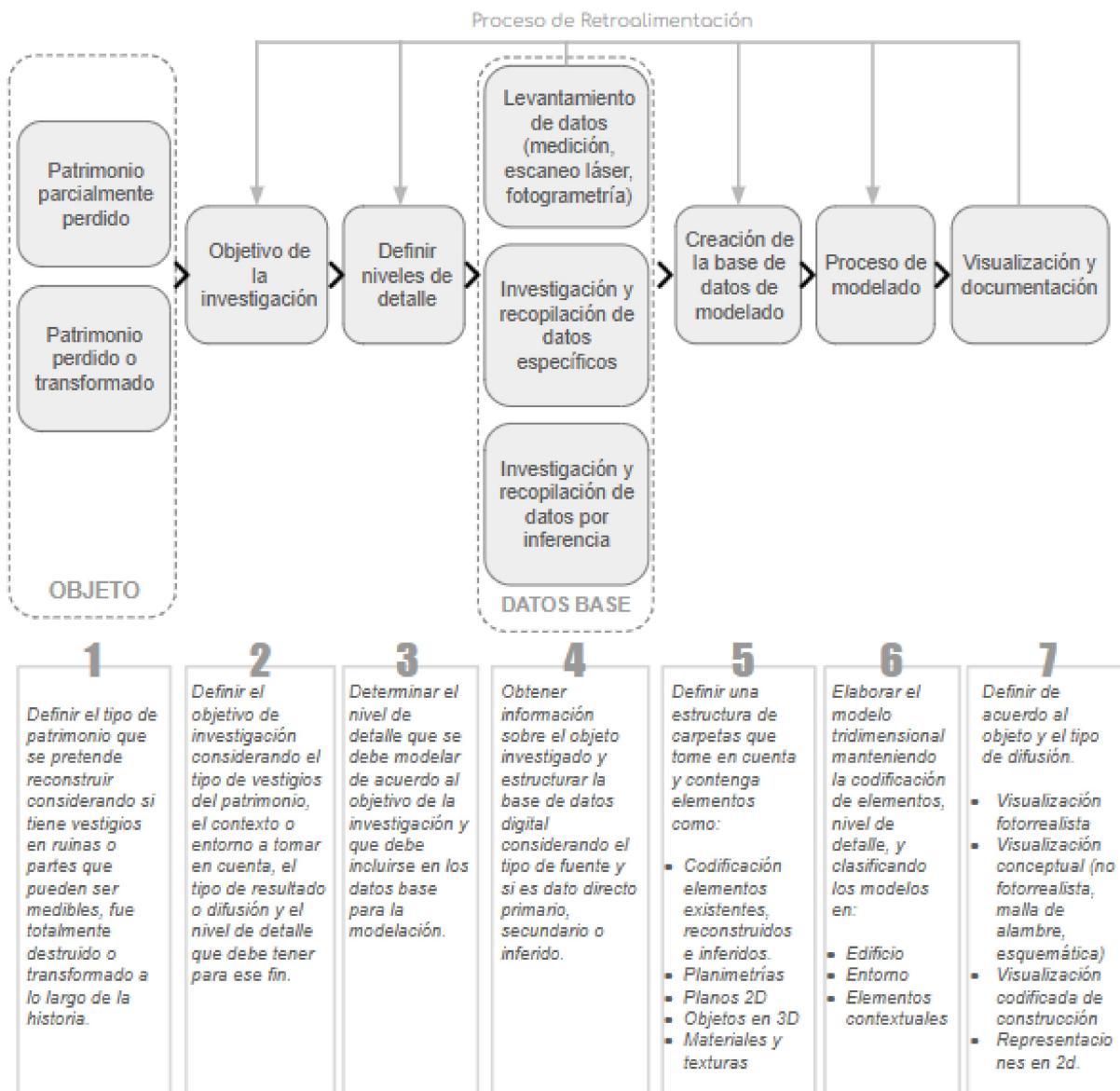


Gráfico 5: Propuesta de etapas para el modelado de reconstrucción virtual del patrimonio.

- **1. Objeto de reconstrucción:** Definir el objeto del que se requiere hacer la reconstrucción virtual identificando la escala de intervención (Objeto arquitectónico o urbano con entorno natural, entorno urbano general o con objetos arquitectónicos con detalle, objeto arquitectónico con entorno parcial, objeto independiente).

Identificar si el objeto es patrimonio parcialmente perdido con vestigios de ruinas existentes o si se trata de patrimonio transformado en el tiempo pero mantiene vestigios identificables y mensurables; y por último, si se trata de patrimonio perdido totalmente que puede reconstruirse de fuentes primarias como fotografías o secundarias como imágenes, gráficos o textos descriptivos.

Este paso permitirá definir el objetivo de la investigación y definirá los pasos de investigación necesarios para la reconstrucción virtual.

- **2. Objetivo de la investigación:** En base a las características del objeto para la reconstrucción virtual identificado en la etapa anterior, plantear el objetivo de la investigación considerando el alcance y tiempo requerido de acuerdo escala de intervención.

Es importante dejar explícito el propósito de la investigación considerando el tipo de difusión final y si es de carácter volumétrico conceptual o de detalle.

- **3. Niveles de detalle:**

En base al objetivo definir el nivel de detalle que se pretende en el modelado. La reconstrucción podría abarcar aspectos volumétricos de ocupación del espacio natural o urbano en el que el detalle de tipo ornamental no sea necesario, o por el contrario podría tratarse de una reconstrucción en la que el detalle es parte de la investigación y es importante definir la escala de representación del objeto investigado ya sea de forma bidimensional o tridimensional. El nivel de detalle definido para la reconstrucción virtual tendrá influencia directa sobre los datos que deben ser investigados y considerados para los gráficos y modelado.

Identificar el nivel de detalle no solo puede permitir optimizar el tiempo de investigación sino también el optimizar recursos referidos al hardware en los equipos de computación. Siguiendo el criterio utilizado en software para la creación de entornos virtuales de juegos, los objetos que se encuentran más cerca son los que tienen mayor nivel de detalle.

- **4. Base de datos de información:**

Esta etapa se refiere a la recopilación documental y registro de toda la información necesaria para la etapa de modelado en concordancia con el objetivo y el nivel de detalle definido con anterioridad.

La conformación de la base de datos de toda la información referida al objeto de reconstrucción virtual es la que determina su carácter científico y valida el trabajo de investigación. La cantidad de información puede variar de acuerdo a la escala del objeto a modelar y al tipo de fuentes disponibles del mismo, pero en todos los casos es importante su clasificación no solo de forma conceptual sino también física porque puede incluir fotografías, imágenes, gráficos, textos, relevamientos o escaneos láser entre otros, por lo que es recomendable la organización y clasificación por carpetas y subcarpetas.

En el caso de información faltante del objeto reconstruido, la base de datos incluirá elementos u objetos que pueden inferirse por estilo, época, tipo constructivo y otros elementos que formarán parte de la difusión final, así como las fuentes y el proceso que asume el investigador que deben ser debidamente registrados.

- **5. Base de datos de modelado:**

La base de datos de modelado, comprende la generación de toda la documentación principalmente de carácter gráfico bidimensional o tridimensional obtenida a partir de la etapa anterior y que servirá para la creación del modelado final.

Contiene elementos individuales que posteriormente conformarán el modelo de reconstrucción virtual completo de acuerdo al tipo de difusión definido en los objetivos. El separar por partes el modelo a reconstruir permite optimizar recursos informáticos, facilitar posibles cambios de acuerdo a las hipótesis que surjan en la investigación, y generar una base de datos que posteriormente pueda ser reutilizada en futuras reconstrucciones. Para generar las diferentes partes es recomendable tener bocetos a escala del objeto a modelar para determinar los tamaños y proporciones correspondientes de los mismos y validar la interpretación para proseguir el modelado 3D (Alaguero et al., 2015).

Si el tipo de visualización final es fotorrealista también incluirá archivos de materiales y texturas.

La estructura de la base de datos digital organizada en carpetas y subcarpetas debe seguir los mismos criterios utilizados en la base de datos de información. Es importante considerar en la estructuración o en elementos individuales, una codificación basada en colores o códigos que formarán el modelo final de acuerdo al nivel de fidelidad de los mismos; los objetos medibles o modelados de fotografías claras tendrán mayor nivel de fidelidad que los generados a partir de dibujos o textos descriptivos.

- **6. Proceso de modelado:**

En esta etapa se crean los elementos bidimensionales o tridimensionales generales singulares del objeto a ser reconstruido y se incluyen los generados en la base de datos de modelado. Es importante organizar el modelo generado en base al tipo de difusión determinado en el objetivo, la misma puede incluir gráficos en dos dimensiones, modelado volumétrico general, representación de la fidelidad de la reconstrucción por codificación numérica o de color, modelado para representación fotorrealista, entre otros.

También debe considerarse en la estructuración de carpetas y archivos elementos propios del modelo de reconstrucción, los del entorno natural y elementos contextuales.

- **7. Visualización y documentación:**

El tipo y las características de la información mostrada en esta etapa está directamente relacionada al propósito de la difusión planteada en el objetivo de la investigación.

Tomando en cuenta que independientemente del tipo de visualización generada, esta debe estar sustentada en el proceso investigativo, se debe realizar un resumen del proceso de reconstrucción virtual identificando el tipo de datos utilizados y las hipótesis o inferencias surgidas durante el proceso.

El último aspecto importante en la metodología planteada es el proceso de retroalimentación constante que debe existir durante el proceso de reconstrucción virtual en base a la información obtenida y generada, permitiendo verificar objetivos, validar hipótesis, centrar esfuerzos en aspectos específicos de la reconstrucción y mejorar los resultados obtenidos en la investigación y difusión de la misma.

Se considera importante tomar en cuenta en las bases de datos de información y de modelado la clasificación de la información de acuerdo a las fuentes y la escala de evidencia, misma que también podrá tener su representación gráfica en la etapa de difusión; para ello para reconstrucciones en general se adopta como base principal la propuesta realizada

Escala de evidencia histórico/arqueológica

Escala de colores correspondiente al grado de evidencia histórico arqueológico de elementos representados en reconstrucciones virtuales.

Nº	Color	HEX	R,G,B	Descripción	Tipo de fuente
1		#808281	128,130,129	Imaginación: Elementos basados de forma aproximada en el contexto histórico y natural.	Deductiva
2		#808281	0,69,148	Conjetura basada en estructuras similares o relatos orales: Representación a través de la arquitectura comparada o de elementos similares, o en base a relato oral.	Deductiva, interpretativa
3		#30748E	48,116,190	Referencia textual básica: Descripción textual simple (apenas indicativa).	Indirecta
4		#5FC3E1	95,195,225	Referencia textual descriptiva: Descripción detallada de elementos (dimensiones, materiales, colores, etc.).	Indirecta
5		#7EC399	126,195,153	Referencia gráfica sencilla: Representaciones sencillas en dibujos, grabados o pinturas.	Indirecta
6		#A2C516	162,197,22	Referencia gráfica pormenorizada: Representación detallada en dibujos grabados o pinturas.	Indirecta
7		#FFEE50	255,239,22	Información arqueológica básica o planimetrías simples: Indicios arqueológicos sencillos o plantas y alzados básicos.	Directa
8		#F7AA59	247,170,89	Fuerte evidencia arqueológica o documental: Fotografías arquitectónicas o urbanas, plantas detalladas, planos, mapas catastrales.	Directa
9		#EE7883	238,120,131	Existente (o parcialmente existente) con modificaciones: La estructura u objeto existe en el presente de forma parcial o alterada.	Directa
10		#B61918	182,25,24	Existente conforme al original: La estructura u objeto existe en el presente conforme a como fue en el pasado.	Directa

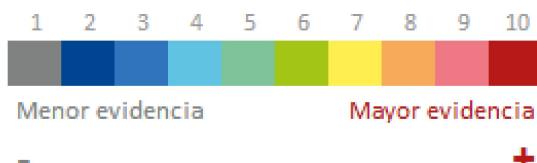


Gráfico 6: Complementación de la Escala de Evidencia propuesta por Aparicio y Figueiredo (2017).

En el caso que la reconstrucción virtual sea sobre ruinas arqueológicas, se considera como alternativa la clasificación mencionada por Pietroni y Ferdani (2021) mostrada en el gráfico 7, complementada con los códigos de colores RGB y Hexadecimal.

Escala de evidencia para reconstrucción en ruinas arqueológicas

Escala de colores correspondiente al grado de evidencia de elementos en reconstrucciones virtuales de ruinas arqueológicas.

Nº	Color	HEX	R,G,B	Descripción
1		#c45b5a	196,9,90	Estructuras existentes: Evidencia arqueológica en el sitio.
2		#e0bd13	224,189,19	Anastilosis virtual fragmentaria: Repositionamiento de fragmentos arquitectónicos derrumbados que fueron encontrados fuera de contexto
3		#a18539	161,133,57	Reconstrucción virtual fragmentaria: Fragmentos reposicionados completados virtualmente
4		#35a4ba	53,164,186	Reconstrucción virtual estructural: Basada en evidencia arqueológica del sitio
5		#508f48	80,143,72	Reconstrucción virtual no estructural: Basada en fuentes y comparaciones.

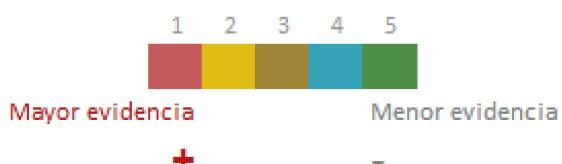


Gráfico 7: Escala de confiabilidad mencionada por Pietroni y Ferdani con codificación de colores (2021)

Discusión

Durante el desarrollo del estudio se pudo constatar el incremento en las reconstrucciones virtuales del patrimonio edificado como un recurso válido para su preservación y difusión, así como su importancia científica y académica para analizar, validar hipótesis y presentar resultados (Masuch et al., 1999; Münster, Sander et al., 2024; Trushaj & Xhelaj, 2024); esto debido a las capacidades crecientes en general de los equipos, programas y recursos tecnológicos que pueden utilizarse. Las diferentes investigaciones y reconstrucciones virtuales del patrimonio abarcan diversos aspectos y estados del patrimonio a investigar como patrimonio existente, parcialmente existente, transformado, o destruido, siendo los resultados obtenidos un aporte al conocimiento y preservación del patrimonio cultural, la educación, y la concientización.

Al ser la reconstrucción o restauración virtual un instrumento no invasivo físicamente, permite generar mayor cantidad de hipótesis y procesos de retroalimentación y validación de los resultados generados ya sea en restos de patrimonio existente, o sin alterar el patrimonio construido.

El registro detallado de todo el proceso de reconstrucción del patrimonio y las decisiones tomadas en el mismo, se convierte en un aporte investigativo y de preservación del objeto reconstruido, ya sea este arquitectónico o urbano (Forte, 2008; Sullivan & Snyder, 2017), siendo la representación virtual tan solo un componente de toda la investigación donde debe dejarse claro el nivel de evidencia física e hipotética del resultado tridimensional (Aparicio Resco & Figueiredo, 2017; ICOMOS, 2017; The London Charter, 2009).

La complejidad en analizar y definir la información a ser tomada en cuenta para la reconstrucción virtual hace relevante contar con metodologías base que puedan guiar el proceso y las etapas que deben considerarse para que el resultado tenga validez y relevancia científica (Forte, 2008; Torres et al., 2010).

Diversos autores plantean metodología o etapas que deben tomarse en cuenta para el proceso de reconstrucción virtual (Al shawabkeh & Arar, 2024; Giovannini, Elisabetta Caterina, 2018; Mascio et al., 2016; Piquer-Cases et al., 2015; Rodrigues et al., 2014) , cada una de las propuestas planteadas contienen elementos importantes a considerar en las etapas de recolección de información, generación del modelo y visualización o difusión.

El aporte del presente trabajo radica en el análisis de las propuestas metodológicas planteadas por diferentes autores, y en base a las mismas así como las características y recomendaciones

para la reconstrucción virtual del patrimonio, elaborar una metodología base que abarque de forma general los diferentes aspectos que deben tomarse en cuenta para organizar la información, elaborar el modelo virtual y la presentación de resultados documentados con el propósito de que la reconstrucción generada sirva de aporte científico al conocimiento del objeto reconstruido.

Es importante mencionar que la propuesta tiene un carácter procedural a manera de guía básica general que debe ser analizada de acuerdo a las particularidades de la reconstrucción virtual a realizar, la información con la que se cuenta y el objetivo planteado.

Se sugiere que las investigaciones sobre el tema planteado o las metodologías utilizadas sean claramente documentadas para permitir generar nuevos elementos a considerar en las etapas de reconstrucción virtual.

Referencias bibliográficas

Al shawabkeh, R., & Arar, M. (2024). Virtual reality as a tool to enhance the efficiency and reliability of the virtual reconstruction process for heritage/archaeological sites: The case of umm Al-Jimal in Jordan. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 33, e00325. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00325>

Alaguero, M., Bustillo, A., Guinea, B., & Iglesias, L. (2015). The Virtual Reconstruction of a Small Medieval Town: The Case of Briviesca (Spain). En F. Giligny, F. Djindjian, L. Costa, P. Moscati, & S. Robert (Eds.), *CAA2014: 21st Century Archaeology* (pp. 575–584). Archaeopress. <https://doi.org/10.2307/jj.15135883.69>

Alfaro Rodríguez, A. (2018). Recuperación de patrimonio urbano desaparecido mediante técnicas de reconstrucción virtual. *Artigrama*, 33, 141-158. https://doi.org/10.26754/ojs_artigrama.artigrama.2018338267

Aparicio Resco, P. (2022, junio 6). Hacia una nueva versión de la escala de evidencia histórico-arqueológica para reconstrucciones virtuales. PAR - Arqueología y Patrimonio Virtual. <https://parpatrimonioytecnologia.wordpress.com/2022/06/06/hacia-una-nueva-version-de-la-escala-de-evidencia-historico-arqueologica/>

AparicioResco,P.,&Figueiredo,C.(2017).ELGRADODEEVIDENCIAHISTÓRICO-ARQUEOLÓGICA DE LAS RECONSTRUCCIONES VIRTUALES: HACIA UNA ESCALA DE REPRESENTACIÓN GRÁFICA. *Revista Otarq: Otras arqueologías*, 1, 235. <https://doi.org/10.23914/otarq.v0i1.96>

Boccardi, Giovanni & Evers, Léonie. (2018). Nuevas tecnologías: ¿el futuro de la reconstrucción? - UNESCO. Patrimonio Mundial, 86, 58-61.

Brůha, L., Laštovička, J., Palatý, T., Štefanová, E., & Štych, P. (2020). Reconstruction of Lost Cultural Heritage Sites and Landscapes: Context of Ancient Objects in Time and Space. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100604>

Forte, M. (2008). CYBER-ARCHAEOLOGY: AN ECO-APPROACH TO THE VIRTUAL RECONSTRUCTION OF THE PAST. DIGITAL HERITAGE, 261-268. <https://doi.org/10.13140/2.1.4005.9522>

Giovannini, Elisabetta Caterina. (2018). Virtual Reconstruction Information Management [Tesis doctoral, University of Bologna]. https://amsdottorato.unibo.it/8330/1/giovannini_elisabetta_caterina_tesi.pdf

Huvila, I. (2021). Monstrous hybridity of social information technologies: Through the lens of photorealism and non-photorealism in archaeological visualization. The Information Society, 37(1), 46-59. <https://doi.org/10.1080/01972243.2020.1830211>

ICOMOS. (2017). Los principios de Sevilla—Principios internacionales de la arqueología virtual. <https://icomos.es/wp-content/uploads/2020/06/Seville-Principles-IN-ES-FR.pdf>

Mascio, D. D., Chiuni, M., Fillwalk, J., & Pauwels, P. (2016). 3D Digital Reconstructions of Lost Buildings. DIGITAL HERITAGE, 2.

Masuch, M., Freudenberg, V., Ludowici, B., Kreiker, S., & Strothotte, T. (1999). Virtual Reconstruction of Medieval Architecture.

Münster , Sander, Apollonio, Fabrizio, Bluemel, Ina, Fallavollita, Federico, Foschi, Riccardo, & Grellert, Marc. (2024). Handbook of Digital 3D Reconstruction of Historical Architecture.<https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/90414/978-3-031-43363-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pietroni, E., & Ferdani, D. (2021). Virtual Restoration and Virtual Reconstruction in Cultural Heritage: Terminology, Methodologies, Visual Representation Techniques and Cognitive Models. Information, 12(4), 167. <https://doi.org/10.3390/info12040167>

Piquer-Cases, J. C., Capilla-Tamborero, E., & Molina-Siles, P. (2015). La reconstrucción virtual del patrimonio arquitectónico y su aplicación metodológica. EGA. Revista de expresión gráfica

arquitectónica, 20(25), 258. <https://doi.org/10.4995/ega.2015.3674>

Rodrigues, N., Magalhães, L., Moura, J., & Chalmers, A. (2014). Reconstruction and generation of virtual heritage sites. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 1(3), 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2014.06.003>

Rodríguez, A. R. (2012). La reconstrucción histórica virtual de la Plaza Mayor de Mérida, Yucatán. UNAM.

Roussou, M., & Drettakis, G. (2003). Photorealism and Non-Photorealism in Virtual Heritage Representation. 10. <https://inria.hal.science/inria-00606745>

Sullivan, E. A., & Snyder, L. M. (2017). Digital Karnak. *Journal of the Society of Architectural Historians*, 76(4), 464-482. <https://doi.org/10.1525/jsah.2017.76.4.464>

The London Charter. (2009). La carta de Londres para la visualización computarizada del patrimonio cultural. https://londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_es.pdf

Torres, J. C., Cano, P., Melero, J., España, M., & Moreno, J. (2010). Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 51. <https://doi.org/10.4995/var.2010.4768>

Trushaj, A., & Xhelaj, B. (2024). Modern technologies in archaeology and their application in architectural object restoration. *Architectural Studies*, 10(1), 79-91. <https://doi.org/10.56318/as/1.2024.79>

Valle Abad, P., Fernández Fernández, A., & Rodríguez Nóvoa, A. A. (2022). Lost archaeological heritage: Virtual reconstruction of the medieval castle of San Salvador de Todea. *Virtual Archaeology Review*, 13(26), 22-44. <https://doi.org/10.4995/var.2022.16178>

Vico López, L. (2011). Metodología y criterios para la reconstrucción virtual del Patrimonio Arquitectónico romano. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 151. <https://doi.org/10.4995/var.2011.4671>