

José Edeson de Melo Siqueira 

Professor Doutor em Educação Matemática e Tecnológica
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
edeson.siqueira@ufpe.br

Max Lira Veras Xavier de Andrade 

Professor Doutor em Engenharia Civil
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
max.andrade@ufpe.br

André Gustavo da Silva Bezerra Lins 

Doutor em Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
andre.blins@ufpe.br

Francisco Luiz dos Santos 

Professor Doutor em Física
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
chicosantosufrpe@gmail.com

Sílvio de Barros Melo 

Professor Doutor em Ciência da Computação
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
sbm@cin.ufpe.br

Murilo Artur Araújo da Silveira 

Professor Doutor em Comunicação e Informação
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
murilo.asilveira@ufpe.br

Daniela Eugênia Moura de Albuquerque 

Doutoranda em Ciência da Informação
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
daniela.eugenia@ufpe.br

GÊMEOS DIGITAIS APLICADOS AO PATRIMÔNIO CULTURAL: PROPOSTA METODOLÓGICA PARA UM OBSERVATÓRIO NACIONAL

Resumo

Os Gêmeos Digitais são um avanço tecnológico na documentação e gestão da conservação do patrimônio cultural, permitindo representar diagnósticos preventivos dos bens tombados. Contudo, no Brasil, a falta de protocolos nacionais limita a adoção institucional dessa prática sustentável. Este artigo tem como objetivo propor uma metodologia para a criação de um Observatório Nacional do Patrimônio Cultural, fundamentada no uso dos Gêmeos Digitais Patrimoniais como ferramenta de apoio à preservação, gestão da conservação e difusão do patrimônio cultural brasileiro. O modelo metodológico divide-se em nove fases que abrangem desde a definição de requisitos e coleta de dados, até a modelagem *Heritage Building Information Modelling*, Sistema de Informação Geográfica, monitoramento, gestão sustentável, mediação cultural e validação dos Gêmeos Digitais Patrimoniais em escala nacional. Como resultados, o modelo integra dimensões técnicas, normativas e socioculturais e a sua aplicação possibilita a consolidação de um Protocolo Nacional de Documentação e Monitoramento Digital, garantindo padronização e interoperabilidade. Conclui-se que a proposta metodológica do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural representa uma inovação capaz de posicionar o Brasil na fronteira dos debates internacionais sobre patrimônio digital, ao mesmo tempo em que responde a demandas locais de preservação, conservação, governança e valorização cultural.

Palavras-chave: preservação do patrimônio cultural; H-BIM-SIG; Observatório Nacional do Patrimônio Cultural; protocolo nacional.

DIGITAL TWINS APPLIED TO CULTURAL HERITAGE: METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR A NATIONAL OBSERVATORY

Abstract

Digital Twins are a technological advance in the documentation and management of cultural heritage conservation, allowing for preventive diagnostics of listed properties. However, in Brazil, the lack of national protocols limits the institutional adoption of this sustainable practice. This article aims to propose a methodology for the creation of a National Cultural Heritage Observatory, based on the use of Digital Heritage Twins as a tool to support the preservation, conservation management, and dissemination of Brazilian cultural heritage. The methodological model is divided into nine phases, ranging from the definition of requirements and data collection to Heritage Building Information Modeling, Geographic Information System, monitoring, sustainable management, cultural mediation, and validation of Digital Heritage Twins on a national scale. As a result, the model integrates technical, regulatory, and sociocultural dimensions, and its application enables the consolidation of a National Protocol for Digital Documentation and Monitoring, ensuring standardization and interoperability. It can be concluded that the methodological proposal of the National Cultural Heritage Observatory represents an innovation capable of positioning Brazil at the forefront of international debates on digital heritage, while responding to local demands for preservation, conservation, governance, and cultural appreciation.

Keywords: preservation of cultural heritage; H-BIM-GIS; National Observatory of Cultural Heritage; national protocol.

INTRODUÇÃO

A preservação do patrimônio cultural enfrenta desafios crescentes diante da degradação ambiental, limitações orçamentárias e necessidade de conciliar conservação com sustentabilidade econômica. Nas últimas duas décadas, o uso do *Building Information Modelling* (BIM) e, mais especificamente, do *Heritage BIM* (H-BIM)¹, consolidou-se como uma abordagem metodologia central para registro documental e gestão de bens culturais (Dore; Murphy, 2012; Murphy; McGovern; Pavia, 2009).

Na dimensão apontada, os Gêmeos Digitais (*Digital Twins* – DTs) têm sido explorados como aprimoramentos dos processos BIM visando criar valor sustentável e vantagens competitivas (Take [...], c2025), ao integrarem modelagem digital, sensores da Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e governança de dados, a partir de uma infraestrutura cognitiva dinâmica (Boje *et al.*, 2020; Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025; Pavlidis, 2025). Os DTs associados ao H-BIM, permitem aprimorar e adaptar continuamente os projetos, dinamizar a governança e incrementar o acompanhamento de projetos em tempo real. Em suma, os DTs podem ser definidos como réplicas digitais dinâmicas, conectadas em tempo real a sistemas físicos para monitoramento contínuo, análise preditiva e simulação de cenários (Boje *et al.*, 2020).

No campo do patrimônio cultural, temos os Gêmeos Digitais Patrimoniais (*Heritage Digital Twins* – HDTs) com as seguintes possibilidades: a) integração de dados de sensoriamento da IoT e monitoramento ambiental (Guo *et al.*, 2024); b) estruturas semânticas interoperáveis, baseadas em ontologias como *Conceptual Reference Model* (CIDOC-CRM)², *Industry Foundation Classes* (IFC)³ e *Building Topology Ontology* (BOT)⁴ (Barzaghi *et al.*, 2025); e c) modelagem cognitiva por meio de IA e grafos de conhecimento, transformando

¹ Nas últimas duas décadas, o uso do Building Information Modelling (BIM) e, mais especificamente, do *Heritage BIM* (H-BIM). O termo *Historic Building Information Modelling* (HBIM) foi inicialmente utilizado para descrever a aplicação do BIM à documentação de edifícios históricos (Murphy; McGovern; Pavia, 2009). Contudo, nas últimas décadas, houve uma mudança terminológica e conceitual significativa para *Heritage Building Information Modelling* (H-BIM). Essa transição reflete a ampliação do escopo de aplicação – de um enfoque estritamente arquitetônico ou construtivo ("*historic buildings*") para uma abordagem mais abrangente, que incorpora valores culturais, usos sociais e contextos históricos do patrimônio edificado e imaterial (Brumana; Ioannides; Previtali, 2019; Dore; Murphy, 2012). Assim, *Heritage* implica não apenas antiguidade, mas valor cultural reconhecido, ampliando a relevância do H-BIM para práticas de conservação integradas, educação patrimonial e gestão de riscos.

² Permite a interoperabilidade semântica entre sistemas de documentação de museus, arquivos e bibliotecas.

³ Facilita o intercâmbio de dados entre softwares de projeto (ex.: AutoCAD, Revit, ArchiCAD).

⁴ Integra dados da construção no *Linked Data* e facilita ligação com outras ontologias (ex.: IFC → BOT → outras ontologias de sensores, energia etc.).

os DTs em sistemas inteligentes de apoio à decisão (Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025; Felicetti; Niccolucci, 2025).

O aporte operacional dos DTs no campo do patrimônio ainda se encontra em fase exploratória e fragmentada. Estudos internacionais com iniciativas na Europa e na Ásia, apontam avanços metodológicos, como a avaliação de maturidade dos HDTs (Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025; Pavlidis, 2025; Shang *et al.*, 2025; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025). Entretanto, no contexto dos países latino-americanos não existem sequer protocolos consolidados para os HDTs, assim como há uma escassez de validações em larga escala, a integração de indicadores e informações de governança, a falta de sustentabilidade econômica e os desafios éticos na representação cultural.

No Brasil, essas lacunas tornam-se ainda mais evidentes. Embora haja avanços pontuais em registro documental (físico e/ou digital) e H-BIM, inexistem protocolos que articulem um processo integrado, normativo e replicável para o desenvolvimento de DTs aplicados ao patrimônio cultural. Este cenário limita o aproveitamento pleno do potencial dessas tecnologias no planejamento da conservação integrada de conjunto e monumentos, na conservação preventiva, na educação patrimonial e na economia criativa.

Boa parte dos estudos sobre os HDTs permanecem no campo conceitual ou em aplicações laboratoriais, com pouca validação em larga escala ou envolvimento direto das comunidades locais, o que limita sua aplicabilidade prática (Shang *et al.*, 2025; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025). Do ponto de vista econômico, observa-se que a maioria dos modelos enfatiza aspectos técnicos e estruturais, mas ainda dedica pouca atenção às possibilidades de articulação com estratégias de sustentabilidade financeira, turismo inteligente e economia criativa, como observam Wang *et al.* (2025). Finalmente, a integração de IA em DTs traz consigo preocupações relacionadas à ética, transparência, mitigação de vieses e à representação plural das narrativas culturais, aspecto debatido em Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025).

Diante do cenário apresentado, este artigo tem como objetivo geral propor uma metodologia para a criação de um Observatório Nacional do Patrimônio Cultural, fundamentada no uso dos Gêmeos Digitais Patrimoniais como ferramenta de apoio à preservação, gestão da conservação e difusão de patrimônio cultural brasileiro.

O estabelecimento do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural enquanto aplicação factível para contemplar as lacunas existentes e adaptada à realidade brasileira, está baseada em nove fases metodológicas:

- 1) definição de requisitos e protocolos nacionais voltados aos bens culturais;
- 2) coleta da documentação física, digital e multiespectral;
- 3) planejamento e desenvolvimento de bases e bancos de dados;
- 4) Modelagem H-BIM - Integração Geoespacial (SIG);

- 5) estruturação dos Gêmeos Digitais Patrimoniais;
- 6) monitoramento inteligente e predição de riscos dos bens culturais;
- 7) planejamento territorial, governança e sustentabilidade;
- 8) mediação cultural, educação patrimonial e engajamento social; e
- 9) validação, consolidação e escalabilidade nacional.

A proposta contempla a consolidação de protocolos que permitam a integração do H-BIM com DTs enriquecidos com dados IoT e análises preditivas, com ampliação do monitoramento, do diagnóstico e da gestão baseada em risco. Paralelamente, o Observatório Nacional do Patrimônio Cultural pretende estabelecer taxonomias e ontologias próprias, compatíveis com padrões internacionais como o CIDOC-CRM, sintonizadas com as iniciativas de *Linked Open Data* (LOD), OntoBIM⁵, ifcOWL⁶ ou BOT, além de estabelecer uma interconexão com as normas brasileiras como a NBR ISO 12.006-2/2018 (ABNT, 2018) e a NBR 15.965/2011 (ABNT, 2011), para garantir a interoperabilidade, a transparência e a preservação digital de longo prazo.

O artigo encontra-se dividido nas seguintes partes: a) revisão da literatura; b) proposta metodológica das nove fases; c) discussão; d) comparação das metodologias internacionais; e) inovação do modelo brasileiro; f) contribuições de diretrizes técnicas e normativas, considerando aspectos econômicos e sociais; g) considerações finais.

REVISÃO DA LITERATURA

A literatura científica internacional no cenário da documentação 3D, da modelagem H-BIM, da integração de sensores, dos gêmeos digitais e da educação patrimonial digital, apresenta avanços significativos. Contudo, persistem lacunas na padronização de protocolos, no uso integrado de IA para

⁵ OntoBIM — é uma abordagem que combina ontologias formais com modelos BIM para permitir interoperabilidade semântica, integrando dados do ambiente construído com grafos de conhecimento. Em essência, trata-se de uma ponte entre o universo da modelagem paramétrica (ex.: Revit, IFC) e representações baseadas em ontologias, como o CIDOC-CRM, permitindo relacionar componentes construtivos a significados históricos, culturais e funcionais. Essa estrutura facilita a ligação com outras ontologias (como BOT ou SSN), promovendo a interoperabilidade entre domínios distintos — patrimônio, energia, sensores e cidade inteligente (Barzaghi *et al.*, 2025). No contexto do patrimônio cultural, o uso do OntoBIM viabiliza representações mais ricas, conectando o “como foi construído” ao “por que é significativo”.

⁶ ifcOWL — é uma representação semântica do padrão *Industry Foundation Classes* (IFC), usada no BIM, em linguagem *Web Ontology Language* (OWL). Essa tradução formal permite integrar os dados de construção a ambientes de web semântica, viabilizando consultas por grafos, raciocínio lógico e interoperabilidade com outras ontologias, como BOT e CIDOC-CRM. No contexto do patrimônio, ifcOWL é essencial para transformar modelos BIM (tradicionalmente voltados à engenharia) em fontes de conhecimento interoperável, acessível a museus, bibliotecas digitais e sistemas de preservação (Barzaghi *et al.*, 2025; Felicetti & Niccolucci, 2025). Isso possibilita criar gêmeos digitais patrimoniais que dialogam tanto com dados técnicos quanto com semânticas culturais.

análise de dados e na aplicação de metodologias educacionais interativas baseadas em dados reais.

Antes da aplicação das tecnologias de digitalização e monitoramento, a literatura científica recomenda a definição de requisitos e protocolos normativos, tanto de sistemas (RS) quanto de preservação (RP). Essa etapa inicial garante coerência metodológica, rastreabilidade metrológica e comparabilidade de dados entre diferentes campanhas de levantamento e diferentes bens culturais.

Nos processos de coleta e armazenamento da documentação digital, Capecchi *et al.* (2024) destacam a necessidade de *workflows* (fluxos de trabalho) padronizados de escaneamento TLS, que incluem calibração, validação de dados e controle de qualidade. Esses protocolos normativos asseguram a confiabilidade métrica e a reprodutibilidade científica, fundamentais para observatórios nacionais e bases interoperáveis em longo prazo.

Complementarmente, arcabouços internacionais como o CIDOC CRM (ISO 21127) estabelecem estruturas conceituais para organização da documentação patrimonial interoperável, permitindo organizar requisitos de preservação em dimensões históricas, materiais e contextuais. Já a ICCROM (2016), em seu guia de gestão de riscos, recomenda a integração de indicadores físicos, históricos e de uso para definir protocolos de preservação preventiva.

Assim, o primeiro passo do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural se ancora em três pilares fundamentais: 1) definição clara de requisitos de sistemas e preservação (RS e RP); 2) coleta, organização e armazenamento de documentos normativos e gestão e formulação de indicadores de risco; e 3) estabelecimento de protocolos de qualidade com rastreabilidade metrológica, alinhados às práticas internacionais de digitalização patrimonial. Desse modo, base conceitual e normativa para o Observatório garantem que as fases posteriores (levantamento, modelagem, monitoramento e educação) sejam sustentadas por processos consistentes, auditáveis e replicáveis em escala nacional.

A documentação tridimensional do patrimônio cultural edificado tem evoluído com tecnologias como varredura a laser terrestre (TLS) e fotogrametria por veículos aéreos não tripulados (UAV), consolidadas por Nex e Remondino (2014). Esses métodos, combinados em fluxos híbridos, ampliam a cobertura, superam restrições de visada e produzem modelos com registro fototexturizado úteis tanto para diagnóstico quanto para conservação.

Adamopoulos *et al.* (2020) e Moropoulou *et al.* (2018) destacam a integração de sensores multiespectrais e métodos não destrutivos (ex.: termografia, ultrassom, GPR - *Ground Penetrating Radar*) para identificar patologias construtivas e avaliar a integridade material. Complementarmente, Capecchi *et al.* (2024) propõem um fluxo de trabalho padronizado para TLS em sítios patrimoniais, com protocolos de aquisição, calibração e controle de qualidade, fortalecendo a rastreabilidade metrológica - aspecto crucial para um observatório nacional. Apesar dos avanços, a literatura científica nacional ainda

carece de estudos aplicados a bens tombados com geometrias complexas, a exemplo da Catedral de Brasília, em que se evidencia a necessidade de adaptação e normatização desses métodos no Brasil.

A proposta do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural amplia o seu horizonte para o *Heritage* BIM (H-BIM) envolvendo não apenas as edificações históricas, mas o patrimônio cultural de forma ampla. A proposta contempla a integração semântica, organiza edificações históricas como modelos paramétricos vinculados a dados geométricos, históricos e patológicos, integrando levantamentos via *laser scanning* e fotogrametria (Brumana; Ioannides; Previtali, 2019; Murphy; McGovern; Pavia, 2009; Dore; Murphy, 2012). Essa abordagem centraliza e reutiliza informações de forma eficiente para conservação e gestão.

No Brasil, Froner *et al.* (2024) aplicaram H-BIM ao mapeamento de danos na fachada da Igreja de São Francisco de Assis (Ouro Preto), demonstrando potencial, mas sem apresentar protocolos nacionais para interoperabilidade. A integração entre H-BIM e SIG, seguindo padrões como IFC e *CityGML* (padrão de código aberto emitido pelo OGC - *Open Geospatial Consortium*), amplia as possibilidades de análise espacial e integração urbana. Nesse contexto, Tejedor *et al.* (2022) exploram a combinação de H-BIM e Gêmeos Digitais para avaliar eficiência energética e risco sísmico, demonstrando o potencial dessa abordagem para gestão preventiva e sustentável do patrimônio. Além disso, é possível adotar taxonomias patrimoniais nacionais integradas a H-BIM/SIG, criando uma base técnica interoperável alinhada a práticas internacionais.

Esses avanços descritos tornam os DTs uma das principais tendências na gestão patrimonial contemporânea, ao expandirem o potencial do H-BIM e conectarem documentação técnica, diagnósticos preventivos e estratégias de valorização cultural. Apesar do crescente interesse internacional, a literatura científica evidencia importantes lacunas e limitações na aplicação dos DTs ao patrimônio cultural, tais como:

- a) fragmentação metodológica: inexistem fluxos unificados que integrem documentação, modelagem, monitoramento e aplicação social em um protocolo consolidado (Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025);
- b) validação restrita: a maior parte dos estudos encontra-se em estágios laboratoriais ou em casos-piloto de pequena escala, sem comprovação em contextos nacionais ou regionais (Guo *et al.*, 2024; Shang *et al.*, 2025);
- c) governança de dados: carência de padrões amplamente aceitos para interoperabilidade e preservação digital em ambientes distribuídos e multilíngues (Barzaghi *et al.*, 2025);
- d) sustentabilidade econômica e cultural: pouca atenção à integração de DTs com a economia criativa, turismo inteligente e modelos de autossustentação patrimonial (Wang *et al.*, 2025);
- e) questões éticas e representatividade cultural: desafios relacionados à pluralidade de narrativas e à mitigação de vieses em sistemas baseados em IA (Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025).

A seguir, o Quadro 1 apresenta uma síntese crítica da revisão de literatura, organizada em seis temas, evidenciando de forma comparativa os avanços já consolidados no campo, as lacunas ainda existentes e as inovações que o Observatório Nacional do Patrimônio Cultural pretende introduzir.

TEMA	O QUE A LITERATURA JÁ ABORDA	LACUNAS IDENTIFICADAS	INOVAÇÃO PROPOSTA PELO OBSERVATÓRIO
Requisitos e Protocolos	<i>Workflows</i> padronizados de escaneamento TLS com calibração e rastreabilidade (Capecchi <i>et al.</i> , 2024). Estruturas conceituais de interoperabilidade (CIDOC CRM, ISO 21127).	Ausência de protocolos nacionais de documentação e monitoramento. Fragmentação na gestão de requisitos de preservação.	Estabelecimento de Protocolo Nacional , com Requisitos de Sistemas (RS) e de Preservação (RP) , rastreabilidade metrológica e integração normativa.
Coleta da Documentação Multiespectral	Uso de TLS e UAV em fluxos híbridos (Nex; Remondino, 2014). Integração de sensores multiespectrais e testes não destrutivos (NDT) para diagnóstico (Adamopoulos <i>et al.</i> , 2020; Tejedor <i>et al.</i> , 2022).	Pouca aplicação em bens tombados brasileiros de geometrias complexas. Escassez de protocolos para ambientes tropicais e condições adversas.	Aplicação sistemática em bens tombados no Brasil, calibrando fluxos em condições diversas. Criação de benchmarks nacionais para TLS/UAV/NDT.
Modelagem H-BIM e Integração com SIG	Estruturas H-BIM como modelos paramétricos vinculados a dados (Brumana; Ioannides; Previtali, 2019; Dore; Murphy, 2012; Murphy; McGovern; Pavia, 2009). Integração H-BIM-SIG e uso de gêmeos digitais para eficiência energética e riscos (Tejedor, 2022).	Falta de taxonomias nacionais integradas ao H-BIM. Escassez de protocolos de interoperabilidade no contexto brasileiro.	Desenvolvimento de H-BIM-SIG interoperável , com taxonomias patrimoniais nacionais e integração de dados históricos, diagnósticos e contextuais.

<p>Monitoramento e Gêmeos Digitais</p>	<p><i>Digital Twins</i> aplicados à predição de deterioração e gestão de riscos (Boje <i>et al.</i>, 2020). Experiências pioneiras no Brasil com H-BIM para diagnóstico de danos (Froner <i>et al.</i> 2024).</p>	<p>Governança de dados ainda pouco estruturada. Escassez de casos aplicados ao patrimônio brasileiro.</p>	<p>Criação de Gêmeos Digitais Nacionais com IA preditiva e integração IoT para manutenção preventiva em bens tombados.</p>
<p>Educação Patrimonial Digital</p>	<p>RA e RV como ferramentas de mediação cultural (Boboc <i>et al.</i>, 2022). Jogos Sérios e experiências urbanas interativas (<i>city quests</i>) para engajamento da geração alfa (Capecchi <i>et al.</i>, 2024). Revisões de RA/RV aplicadas ao patrimônio (Boboc <i>et al.</i>, 2022; Ramtohl; Khedo, 2024).</p>	<p>Ausência de metodologias gamificadas baseadas em dados reais de monitoramento. Pouca integração de RA/RV com H-BIM/SIG.</p>	<p>Desenvolvimento de narrativas interativas e gamificação conectadas a dados reais do Observatório, ampliando impacto educacional, turístico e comunitário.</p>
<p>Integração com ODS e Sustentabilidade</p>	<p>ODS 11 reconhece a importância da resiliência e sustentabilidade urbana (IPEA, 2024; UNESCO, 2011). Estudos de eficiência energética e risco sísmico em patrimônio (Tejedor <i>et al.</i> 2022).</p>	<p>Pouca conexão explícita entre digitalização do patrimônio e Agenda 2030 no contexto brasileiro.</p>	<p>Alinhamento direto do Observatório com ODS 9, ODS 11 e ODS 17, integrando preservação patrimonial a políticas públicas de inovação e sustentabilidade.</p>

Quadro 1. Síntese crítica da revisão de literatura. Fonte: Os autores (2025).

Diante desse panorama, observa-se que, embora a literatura científica internacional já apresente avanços expressivos em documentação tridimensional, H-BIM, integração de sensores e educação patrimonial digital, ainda persistem lacunas significativas no contexto brasileiro, especialmente no que se refere à padronização de protocolos, à interoperabilidade entre

plataformas, ao uso de inteligência artificial preditiva e à aplicação de metodologias educacionais baseadas em dados reais.

É nesse ponto que a proposta do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural se insere, indicando soluções inovadoras e adaptadas à realidade nacional, capazes de preencher tais lacunas e, ao mesmo tempo, ampliar o impacto científico, tecnológico, cultural e social da preservação do patrimônio digital.

PROPOSTA METODOLÓGICA: ESTRUTURA EM NOVE FASES

O arcabouço metodológico proposto organiza-se em nove fases sequenciais e interdependentes, que articulam dimensões tecnológicas, normativas e socioculturais. Cada fase corresponde a um estágio específico do processo de desenvolvimento dos HDTs, assegurando coerência, rastreabilidade e aplicabilidade prática no contexto brasileiro⁷.

A Figura 1 apresenta o resumo das nove fases que se encontram detalhadas abaixo:

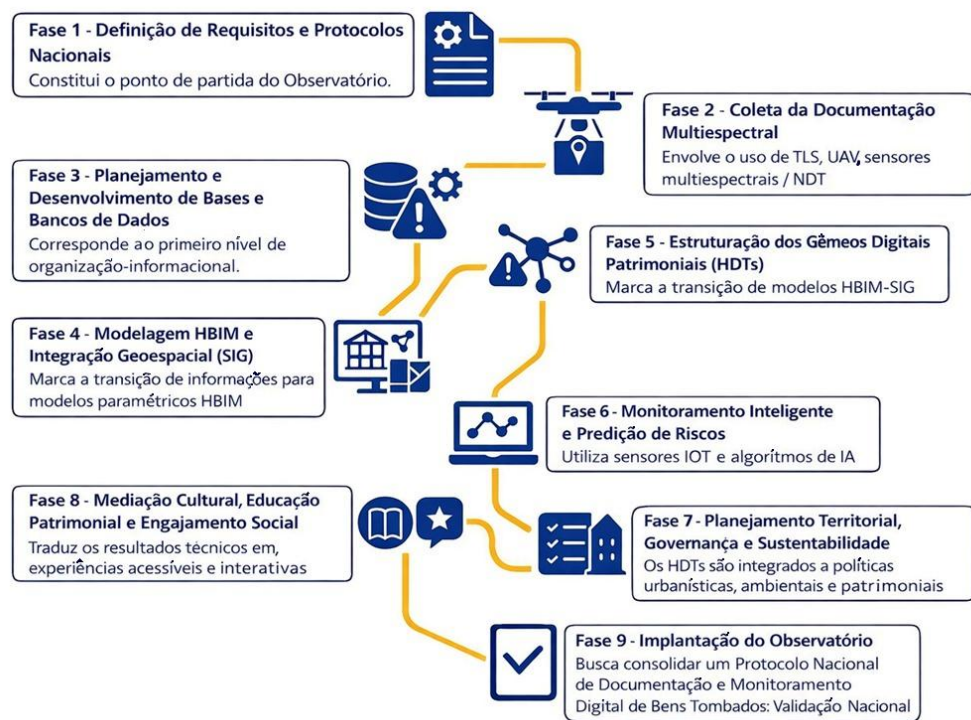


Figura 1. Resumo do percurso metodológico.
Fonte: Os autores (2025).

⁷ Como uma fase preliminar, propõe-se criar uma base de dados específica que integre dados multimodais migradas das bases de bens materiais do IPHAN (a depender da existência e situação desses bancos de dados), complementadas por dados colhidos em visitas *in loco*. Sobre essas bases um sistema de IA atuará para produzir um indicador através do qual é produzida uma lista de prioridades ordenada com os patrimônios visitados preliminarmente, acompanhado dos previamente cadastrados pelo IPHAN. O indicador levará em conta o estado de conservação, o custo estimado para produzir o DT, a importância histórica e cultural, o tipo e complexidade do patrimônio etc. O indicador deve levar em conta também a facilidade que o patrimônio terá para produzir um modelo 3D: por exemplo, se existem plantas baixas, o custo deve diminuir em relação à geração de nuvem de pontos. A lista de prioridades deverá fornecer subsídios para tomadas de decisão na priorização no cronograma de distribuição de recursos para os bens históricos e seus DTs.

A Fase 1, **Definição de Requisitos e Protocolos Nacionais**, constitui o ponto de partida do modelo e tem como objetivo estabelecer a base normativa e técnica para a implementação dos HDTs no Brasil. Nessa etapa, são realizados o levantamento de documentos legais, normativos e conceituais (IPHAN, UNESCO, ICCROM, ICOMOS), a definição de Requisitos de Sistema (RS) e de Preservação (RP), fundamentados para coleta de documentação sobre o desempenho da edificação, organização de documentos normativos, indicadores técnicos e parâmetros de rastreabilidade metrológica, além do alinhamento com *workflows* internacionais de escaneamento digital (Capecchi *et al.*, 2024). Como resultado, espera-se a consolidação de protocolos nacionais de qualidade e rastreabilidade metrológica, integrados a fundamentos técnicos e legais.

Além dos elementos normativos e técnicos já descritos, esta fase deve contemplar, de forma estruturada, a definição de critérios e indicadores para a priorização dos bens a serem digitalizados. Essa priorização estratégica orienta a alocação de recursos com base em cinco eixos principais: valor cultural e histórico, risco de perda, estado de conservação, potencial de uso e viabilidade técnica. Cada eixo reúne critérios objetivos - como reconhecimento institucional, exposição a riscos, relevância para pesquisa e condições operacionais - alinhados a políticas públicas culturais. A decisão baseada em dados fortalece a efetividade do Observatório, assegura alinhamento com práticas internacionais e favorece a escalabilidade do modelo.

A Fase 2, **Coleta da Documentação Multiespectral**, cujo objetivo é gerar, organizar e armazenar registros geométricos, materiais, ambientais de alta precisão, além de aspectos da documentação cadastral (fontes primárias e secundárias, mapas, iconografia, audiovisual, processo de salvaguarda) relacionados a valores imateriais/intangíveis, como práticas sociais relacionadas ao monumento e seu sítio, rituais, tradições, práticas construtivas e aspectos históricos imateriais. Para tanto, são aplicadas técnicas como TLS (laser scanner terrestre), UAVs voltados à fotogrametria aérea, bem como sensores multiespectrais e de ensaio não destrutivo (NDT), incluindo termografia, GPR e ultrassom. Ademais, dessas técnicas, um trabalho de coleta de documentos permitirá auxiliar na percepção da significância histórico-cultural do monumento. Dessa forma, produzem-se nuvens de pontos georreferenciadas, ortofotos, modelos tridimensionais e mapas de patologias e danos, bem como dos documentos históricos relacionados ao monumento, e de fundamental importância para a sua reconstituição (Moropoulou *et al.*, 2018; Tejedor *et al.*, 2022).

A infraestrutura de sensoriamento multiespectral deve incorporar sistemas embarcados de baixo custo e alta precisão, incluindo: 1) sensores ambientais IoT (temperatura, umidade, qualidade do ar) com protocolos LoRaWAN para comunicação de longo alcance; 2) acelerômetros MEMS triaxiais para detecção de vibrações e deslocamentos estruturais; 3) sensores de deformação (*strain gauges* e fissurômetros digitais) para monitoramento contínuo de patologias; e 4) câmeras térmicas de baixo custo para termografia complementar aos levantamentos por NDT tradicionais. A integração desses sensores em nós

modulares com processamento Edge permite aquisição contínua, pré-processamento local e transmissão otimizada de dados ao repositório central (Armijo; Zamora-Sánchez, 2024).

A Fase 3, **Planejamento e Desenvolvimento de Bases e Bancos de Dados**, constituindo o primeiro nível de organização informacional do Observatório. Nessa etapa, são realizados a curadoria preliminar dos levantamentos, o estabelecimento de taxonomias e critérios de classificação e a integração inicial de dados georreferenciados e documentais. O resultado esperado é a consolidação de bases interoperáveis, com consistência e auditabilidade, capazes de alimentar as fases subseqüentes de modelagem H-BIM-SIG e estruturação dos HDTs.

A Figura 2 exemplifica a proposta inicial da interface do Observatório Nacional do Patrimônio cultural.



Figura 2. Modelo da interface do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural.
Fonte: Os autores (2025).

Na Fase 4, **Modelagem H-BIM e Integração Geoespacial (SIG)**, a documentação é transformada em modelos digitais paramétricos, geoespaciais e documentais. A Modelagem H-BIM incorpora atributos técnicos, tipológicos, estéticos-estilísticos e históricos dos bens tombados, enquanto sua articulação com plataformas SIG permite a análise multiescalar e a integração com informações territoriais. Os resultados são modelos H-BIM-SIG capazes de cruzar informações arquitetônicas, urbanísticas e ambientais, além de recuperar informações documentais associados ao modelo digital (Figura 3) (Dore; Murphy, 2012).



Figura 3. Fragmento do modelo H-BIM-SIG aplicado a um bem patrimonial.
Fonte: Os autores (2025).

A Fase 5 marca a transição para a **Estruturação dos Gêmeos Digitais Patrimoniais**, consolidando réplicas digitais dinâmicas, semânticas e cognitivas (apoiados por IA) dos bens culturais edificados tombados. Os HDTs resultantes são compostos por seis camadas integradas: o modelo H-BIM geométrico-paramétrico, o SIG territorial, dados em tempo real provenientes de IoT, ontologias patrimoniais como CIDOC-CRM, IFC e BOT, repositórios normativos e documentais, e interfaces de visualização interativa, incluindo *dashboards* e RA/RV. O resultado esperado é a criação de HDTs como infraestruturas cognitivas inteligentes, capazes de conectar documentação, monitoramento e interpretação (Boje *et al.*, 2020).

A camada de dados IoT em tempo real baseia-se em arquitetura de rede *mesh* distribuída, com nós sensores auto-organizáveis dotados de microcontroladores ESP32 ou STM32, alimentados por *energy harvesting* (solar/piezoelétrico) para autonomia operacional prolongada. Cada nó implementa fusão multimodal de sensores (temperatura, umidade, aceleração triaxial, deformação estrutural), autodiagnóstico de integridade e sincronização temporal via NTP. O gateway IoT realiza agregação de dados, detecção de anomalias por *edge computing* e transmissão MQTT para o *backend* do HDT, garantindo latência sub-segundo para eventos críticos (Armijo; Zamora-Sánchez, 2024).

Na Fase 6, implementa-se o **Monitoramento Inteligente e a Predição de Riscos**, por meio do uso de sensores IoT, análise de séries temporais e algoritmos de inteligência artificial destinados à detecção precoce de anomalias. Como produto, esperam-se *dashboards* inteligentes e planos de intervenção baseados em risco, otimizando a manutenção preventiva (Figura 4) (Guo *et al.*, 2024; Pavlidis, 2025; Wang *et al.*, 2025).

A predição de riscos é suportada por *pipeline* de processamento híbrido: 1) *edge computing* nos nós sensores para filtragem de ruído e detecção de

A mitigação de vieses algorítmicos emerge tanto na estruturação de grafos de conhecimento (Fase 5), quanto na análise preditiva de desempenho e degradação (Fase 6). Para isso, tem-se a: a) adoção de auditorias algorítmicas periódicas; b) uso de dados desagregados por contexto sociocultural; e c) a incorporação de mecanismos de validação comunitária dos dados e inferências geradas das múltiplas camadas narrativas.

Na Fase 8, os resultados técnicos são traduzidos em experiências acessíveis e de impacto social, por meio de estratégias de **Mediação Cultural, Educação Patrimonial e Engajamento Social**. Para isso, são desenvolvidas aplicações em realidade aumentada e virtual, Jogos Sérios, narrativas digitais, inventários participativos (oficinas dialogadas, visitas *in loco* e mapas afetivos) e roteiros turísticos inteligentes (Figura 5). Essa fase busca ampliar o engajamento e pertencimento comunitário colaborativo e educativo, fortalecer o turismo cultural e fomentar a economia criativa, identificando, reconhecendo e valorizando os elementos da identidade cultural e patrimonial local (Boboc *et al.*, 2022).

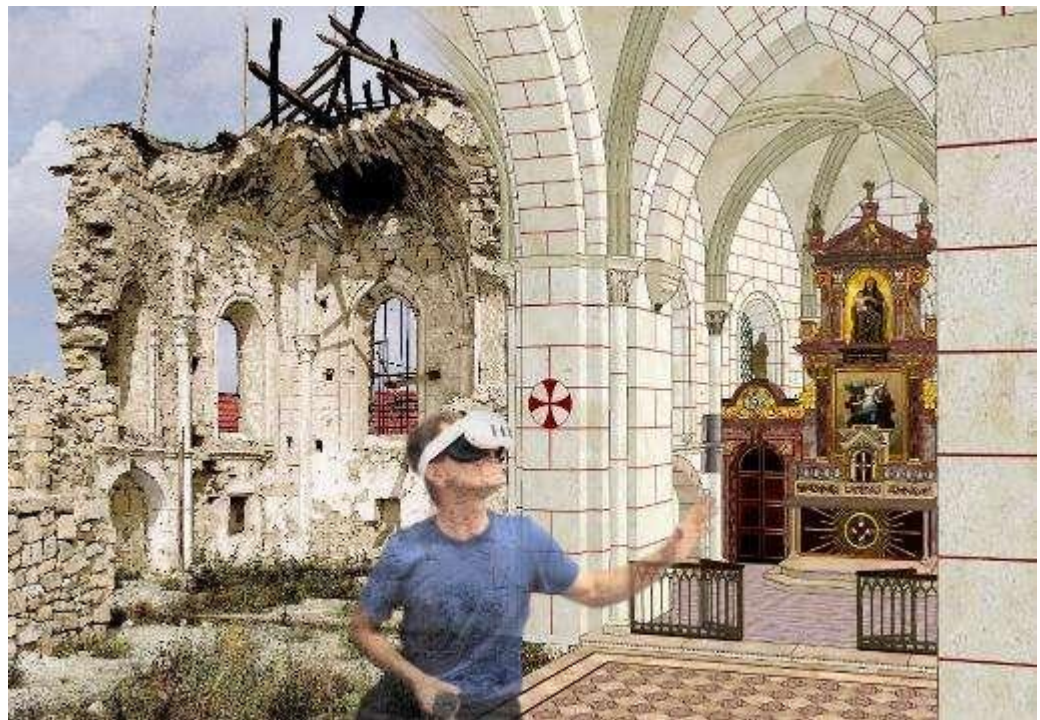


Figura 5. Exemplo de RV aplicada nas ruínas da Igreja "Saint-Loup" de Thillois, na França, região Grand Est. A Igreja é do fim do século XII, início do século XIII. Parcialmente destruída em 1918, na Primeira Guerra Mundial.
Fonte: Os autores (2025).

Por fim, a Fase 9 consiste na **Validação, Consolidação e Escalabilidade Nacional** do modelo. São realizadas auditorias técnicas e institucionais, bem como validações em bens representativos, acompanhadas da criação de kits replicáveis para a ampliação territorial. O resultado esperado é a consolidação de um Protocolo Nacional de Documentação e Monitoramento Digital de Bens Tombados, com potencial de replicação internacional (Figura 6) (Guo *et al.*, 2024; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2024; Wang *et al.*, 2025).



Figura 6. Exemplo de integração ao Observatório Nacional do Patrimônio Cultural.

Fonte: Os autores (2025).

Portanto, o arcabouço em nove fases propõe um percurso metodológico coerente e validável, que integra dimensões técnicas (da conservação das edificações históricas valoradas e tombadas) e ações preventivas baseadas em diretrizes semânticas, normativas e socioculturais, oferecendo uma contribuição inédita para a sistematização dos gêmeos digitais no contexto brasileiro.

DISCUSSÃO

A proposta metodológica em nove fases apresentada neste artigo busca responder a lacunas identificadas na literatura científica internacional, nas ferramentas técnicas e de gestão da conservação dos bens tombados, em nível federal e, ao mesmo tempo, adaptá-las às especificidades e demandas do contexto brasileiro nas diversas esferas das instituições de preservação do patrimônio cultural. A discussão que se segue está organizada em dois eixos principais: 1) a comparação com metodologias internacionais de referência; e 2) os diferenciais e inovações que caracterizam o modelo brasileiro, desenvolvido no âmbito do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural.

Comparação com Metodologias Internacionais

A literatura científica internacional sobre Gêmeos Digitais aplicados ao patrimônio cultural tem avançado de forma significativa, mas ainda apresenta limitações estruturais e conceituais que justificam a formulação de um modelo mais abrangente. Boje *et al.* (2020) descrevem os Gêmeos Digitais como infraestruturas integrativas, capazes de articular dados geométricos, ambientais e operacionais, mas sem detalhar fluxos de transição entre o H-BIM e o DT em contextos patrimoniais complexos. Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025), por sua vez, apresentam o *Heritage Digital Twin Maturity Model* (HDT-MM), um instrumento relevante para avaliação de maturidade

tecnológica, mas que não configura uma metodologia completa para implantação e governança.

Iniciativas institucionais, como as promovidas pelo ICCROM (2016), enfatizam a importância da documentação sistemática e padronizada, estabelecendo diretrizes essenciais para a preservação digital, porém permanecem limitadas ao nível da digitalização, sem avançar para a integração de dados em tempo real ou para a gestão baseada em risco. Em países europeus, esforços recentes têm buscado uma abordagem mais holística - como os estudos de Guo *et al.* (2024), Pavlidis (2025) e Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) -, que aplicam sensores IoT e técnicas de RA/RV em casos-piloto de edificações históricas. Apesar disso, esses trabalhos ainda se restringem a escalas experimentais e carecem de padronização normativa, interoperabilidade ampliada e validação institucional em larga escala.

De modo geral, observa-se que as metodologias internacionais permanecem:

- a) **No nível conceitual ou experimental, sem protocolos aplicados em escala nacional:** Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025) apresentam um modelo de maturidade (HDT-MM) que identifica estágios evolutivos na adoção de DTs, mas ainda carece de fluxos normativos e metodológicos para aplicação institucional. Da mesma forma, Guo *et al.* (2024) e Wang *et al.* (2025) reforçam a relevância das abordagens integradas, porém ressaltam a ausência de instrumentos de validação e certificação nacional, o que limita a escalabilidade dos modelos;
- b) **Centradas em aspectos técnicos, deixando em segundo plano governança e sustentabilidade:** Trabalhos como os de Boje *et al.* (2020) e Dore e Murphy (2012) contribuíram de forma decisiva para a consolidação do H-BIM e da modelagem geométrica de edificações culturais tombadas, mas concentram-se em parâmetros construtivos e de sensoriamento, sem abordar a governança digital e a sustentabilidade organizacional. Barzaghi *et al.* (2025), ao discutir a interoperabilidade semântica e os padrões ontológicos (como IFC e CIDOC-CRM), avança na dimensão técnica, mas não integra mecanismos de planejamento territorial, gestão de riscos e sustentabilidade financeira;
- c) **Desconectadas da economia criativa e das dimensões educacionais:** Enquanto Felicetti e Niccolucci (2025) e Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) destacam o potencial dos Gêmeos Digitais cognitivos e dos grafos de conhecimento para a gestão de informação patrimonial, as dimensões de mediação cultural, turismo inteligente e engajamento social ainda são pouco exploradas. Do mesmo modo, Wang *et al.* (2025) e Shang *et al.* (2025) discutem modelos preditivos e cadeias de valor relacionadas às “boas práticas de conservação” preventiva, mas sem estabelecer pontes com a educação patrimonial e a valorização cultural participativa, componentes essenciais para a sustentabilidade sociocultural do patrimônio.

A partir dessa análise comparativa, observa-se que a proposta brasileira, desenvolvida no âmbito do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural, busca superar essas limitações ao oferecer uma estrutura metodológica de escopo abrangente, que integra dimensões técnicas, normativas, econômicas e sociais. O Quadro 2 exibe de modo sistemático a análise comparativa dessas limitações metodológicas internacionais e dos avanços da proposta apresentada neste artigo.

ASPECTOS	LIMITAÇÕES DAS METODOLOGIAS INTERNACIONAIS	AVANÇOS DA PROPOSTA BRASILEIRA (OBSERVATÓRIO)	REFERÊNCIAS
Escala e aplicação	Abordagens conceituais ou experimentais, sem protocolos nacionais consolidados.	Estrutura em nove fases com validação e Protocolo Nacional de Documentação e Monitoramento Digital de Bens Tombados.	Guo <i>et al.</i> (2024) Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025) Wang <i>et al.</i> (2025)
Foco técnico x Governança	Ênfase em modelagem H-BIM e monitoramento IoT, sem camadas robustas de governança ou sustentabilidade.	Integração de planejamento territorial, governança digital federada e sustentabilidade, alinhada aos ODS.	Barzaghi <i>et al.</i> (2025) Boje <i>et al.</i> (2020) Dore e Murphy (2012)
Economia criativa e educação patrimonial	Pouca ou nenhuma articulação com turismo, economia criativa e engajamento comunitário.	Inclusão explícita da educação patrimonial (Fase 8) e do turismo inteligente, com gamificação, RA/RV e produtos digitais culturais.	Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) Felicetti e Niccolucci (2025) Shang <i>et al.</i> (2025) Wang <i>et al.</i> (2025)
Integração holística	Metodologias fragmentadas, focadas em partes do ciclo de vida (documentação ou predição).	Fluxo único e articulado em nove fases sequenciais e interdependentes, conectando patrimônio, tecnologia, governança, cultura e sustentabilidade.	Boje <i>et al.</i> (2020) Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025)

Quadro 2. Análise comparativa temática das limitações metodológicas internacionais e dos avanços da proposta brasileira no âmbito do Observatório Nacional do Patrimônio Cultural.
Fonte: Os autores (2025).

Paralelamente, traz-se a comparação entre metodologias internacionais e a proposta brasileira de Gêmeos Digitais no Patrimônio Cultural no Quadro 3.

AUTORES / INSTITUIÇÃO	ORIGEM / ABORDAGEM	FOCO METODOLÓGICO	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS	AVANÇOS DO MODELO BRASILEIRO (OBSERVATÓRIO)
Boje <i>et al.</i> (2020)	Reino Unido – Universidade de Cardiff	Integração BIM–IoT–Big Data para gestão de edificações	Abordagem genérica, voltada à construção civil; ausência de protocolos patrimoniais e governança institucional.	Integração adaptada ao patrimônio, com camadas de governança, sustentabilidade e engajamento sociocultural.
ICCROM (2016)	Itália / Internacional	Diretrizes de documentação digital e conservação preventiva	Foco exclusivo em digitalização e catalogação; ausência de atualização dinâmica e integração IoT.	Ampliação para monitoramento inteligente, com base em sensores, IoT e análise preditiva (Fases 5–6).
Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025)	Portugal – Universidade de Aveiro	Aplicação prática de HDTs com sensores e modelagem em estudos de caso	Casos-piloto restritos; ausência de integração normativa e validação institucional.	Integração normativa, territorial e cultural em escala nacional, com foco em governança e políticas públicas.
Guo <i>et al.</i> (2024)	China – Universidades e Institutos de Pesquisa	Uso de RA/RV, sensores e DTs para gestão de risco e consciência situacional no patrimônio cultural	Foco técnico limitado; ausência de articulação com políticas públicas e certificação normativa.	Protocolo institucional com validação técnica e articulação com políticas públicas de patrimônio.
Barzaghi <i>et al.</i> (2025)	Itália – CNR ITABC	Interoperabilidade semântica e ontologias (CIDOC-CRM, IFC, BOT)	Foco técnico; sem integração de governança e sustentabilidade financeira.	Ampliação com governança de dados federada e conformidade com princípios FAIR e LGPD.
Felicetti e Niccolucci (2025); Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025)	Itália – PIN & CNR-ISTI	Arcabouço inteligente com foco em infraestrutura semântica e integração com H-BIM e IA	Ênfase técnica e estrutural; ausência de sustentabilidade institucional e econômica.	Inclusão de fases de planejamento territorial, sustentabilidade e economia criativa (Fases 7-8).
Wang <i>et al.</i> (2025); Shang <i>et al.</i> (2025)	China – Universidades de Tsinghua e Tongji	Modelos de predição estrutural e análise de comportamento de materiais	Foco em engenharia e manutenção; ausência de dimensão sociocultural ou econômica.	Ampliação com turismo inteligente, economia criativa e sustentabilidade cultural.

Quadro 3. Comparação entre metodologias internacionais e a proposta brasileira de Gêmeos Digitais no Patrimônio Cultural.

Fonte: Os autores (2025).

Enquanto as metodologias internacionais tendem a concentrar-se em etapas específicas do ciclo de vida dos DTs, a proposta apresentada neste artigo, se diferencia ao construir um modelo sistêmico e adaptativo, orientado tanto ao patrimônio cultural material e imaterial, à ciência e tecnologia quanto à governança e sustentabilidade social. Essa estrutura oferece uma base sólida para a criação de políticas públicas e para a replicação de boas práticas em outros contextos latino-americanos, contribuindo para o avanço do campo dos Gêmeos Digitais aplicados ao patrimônio cultural.

A Figura 7 sintetiza graficamente as diferenças entre as principais metodologias internacionais de Gêmeos Digitais aplicadas ao patrimônio cultural e o modelo brasileiro apresentado neste artigo. O infográfico evidencia o caráter integrador do arcabouço nacional, ao articular dimensões tecnológicas, semânticas, normativas e socioculturais em um fluxo metodológico único, contrastando com a fragmentação observada em abordagens internacionais.



AUTORES /INSTITUIÇÃO	FOCO METODOLÓGICO	LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS	AVANÇOS DA PROPOSTA BRASILEIRA
 Boje et al. (2020)	BIM-IOT-Big-Data	Abordagem genérica	 →  Integração adaptada ao patrimônio → Ampliação para monitoramento inteligente
 ICCROM (2016)	Modelo de maturidade T ³	Foco exclusivo na digitalização	 →  Estrutura operacional → Integração normativa
 Sugiyama (2025)	Pilotos restritos	Pilotos restritos	 →  Planejamento cultural → Mediação cultural
 Guo et al. (2024)	Predição estrutural	Planejamento da sustentabilidade	 Planejamento cultural → Mediação cultural
 Felicetti et al. (2025)	Predição estrutural	Ausência de dimensão sociocultural	
 Wang et al. (2025)	Predição estrutural	Mediação cultural	

Figura 7. Diferenças metodológicas internacionais. Fonte: Os autores (2025).

O infográfico apresenta a comparação entre as metodologias internacionais de Boje *et al.* (2020), ICCROM (2016), Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025), Guo *et al.* (2024), Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) e Wang *et al.* (2025), e os avanços da proposta apresentada neste artigo. O modelo nacional proposto destaca-se pela integração de múltiplas dimensões (H-BIM, SIG, IoT, RA/RV, ontologias e governança), pela incorporação de sustentabilidade e economia criativa, e pela sua estrutura interoperável, com potencial de escalabilidade e replicação.

Inovação do Modelo Brasileiro

A metodologia proposta diferencia-se das internacionais por quatro aspectos centrais que a posicionam como uma contribuição inédita e adaptada ao contexto brasileiro.

O primeiro aspecto refere-se à integração de múltiplas dimensões em um fluxo único. Enquanto a literatura internacional ainda aponta dificuldades na

articulação entre BIM, IoT e interoperabilidade em ambientes digitais (Boje *et al.*, 2020), e mesmo os arcabouços mais recentes reconhecem a necessidade de abordagens mais holísticas e integradas (Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025), a proposta brasileira avança ao reunir em uma mesma estrutura fases sequenciais que combinam H-BIM, SIG, IoT, governança de dados, realidade aumentada e virtual (RA/RV), economia criativa e engajamento comunitário. Essa combinação supera a fragmentação metodológica, ao aproximar a documentação técnica da sua aplicação social e cultural (Dore; Murphy, 2012).

O segundo aspecto está na ênfase em governança e sustentabilidade. Estudos recentes de Barzaghi *et al.* (2025) e Felicetti e Niccolucci (2025) discutem avanços na governança semântica e na padronização de ontologias, mas deixam em aberto a questão da sustentabilidade institucional e econômica dos gêmeos digitais. O modelo proposto, por sua vez, inova ao incluir fases dedicadas ao planejamento territorial, à governança digital federada e à validação nacional, garantindo não apenas a densidade técnica, mas também a perenidade do processo e o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Essa ênfase amplia o escopo da discussão, associando tecnologia e normatividade a dimensões econômicas e organizacionais (Pavlidis, 2025; Wang *et al.*, 2025).

O terceiro diferencial consiste na valorização da mediação cultural e da educação patrimonial. Grande parte da literatura internacional ainda concentra seus esforços nos aspectos técnicos e estruturais, como no uso de DTs para prever alterações comportamentais em edificações (Shang *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025), deixando em segundo plano o papel educativo e cultural dessas tecnologias. A proposta aqui apresentada incorpora explicitamente a Fase 8, destinada à mediação cultural, ao treinamento patrimonial institucional e comunitário (do inventário participativo ao fomento de "Canteiros Modelos - IPHAN" de treinamento em ofícios técnicos da conservação de edificações de valor cultural), ao turismo inteligente, à gamificação e ao *storytelling* digital. Assim, o Observatório reconhece que os gêmeos digitais não devem se limitar, apenas, a ferramentas de diagnóstico, mas devem funcionar como plataformas de difusão cultural e de fortalecimento da economia criativa (Boboc *et al.*, 2022; Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025).

Por fim, o quarto aspecto diz respeito à escalabilidade nacional com replicabilidade internacional. Embora propostas internacionais como as de Sugiyama, Bourgeois e Rodrigues (2025) avancem na avaliação de maturidade de gêmeos digitais e organismos como o ICCROM (2016) ofereçam diretrizes gerais, a maioria dessas iniciativas permanece em nível conceitual ou experimental, sem protocolos aplicados em escala nacional. A proposta brasileira, ao estruturar um Protocolo Nacional de Documentação e Monitoramento Digital de Bens Tombados, estabelece uma base normativa e técnica capaz de ser replicada em outros países da América Latina, ampliando a relevância científica e prática do modelo (Guo *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025).

Assim, enquanto os modelos internacionais tendem a se concentrar em estágios específicos como registro documental [e digitalização], avaliação de maturidade ou aplicações-piloto, a metodologia brasileira se diferencia por

adotar uma abordagem participativa e adaptativa, com mediação baseada em interatividade e compartilhamento ao contexto institucional, cultural e econômico do país. Ao articular ciência, tecnologia e cultura, o arcabouço se posiciona como uma contribuição inovadora para o campo dos gêmeos digitais no patrimônio cultural.

A Figura 8 sintetiza graficamente os quatro diferenciais que caracterizam a inovação do modelo proposto neste artigo. O infográfico evidencia como o modelo proposto supera a fragmentação observada em abordagens internacionais, articulando integração multidimensional, governança sustentável, mediação cultural e escalabilidade internacional.



Figura 8. Inovação do Modelo Brasileiro de Gêmeos Digitais Patrimoniais.

Fonte: Os autores com base em Boje *et al.* (2020), Dore e Murphy (2012), Sugiyama *et al.* (2025), Barzaghi *et al.* (2025), Felicetti e Niccolucci (2025), Wang *et al.* (2025), Pavlidis (2025) e Boboc *et al.* (2022).

O infográfico apresenta os quatro eixos inovadores do arcabouço proposto para Gêmeos Digitais Patrimoniais: 1) integração multidimensional entre H-BIM, SIG, IoT, RA/RV e governança de dados; 2) ênfase em governança e sustentabilidade, alinhada aos ODS; 3) valorização da mediação cultural e da educação patrimonial; e 4) escalabilidade nacional com replicabilidade internacional.

CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

O arcabouço metodológico em nove fases para o desenvolvimento de Gêmeos Digitais Patrimoniais, proposto neste artigo, visa oferecer um modelo inovador e validável, capaz de articular ciência, tecnologia e cultura na gestão do patrimônio edificado. A proposta se fundamenta nas lacunas identificadas pela literatura internacional, que ainda carece de protocolos consolidados e aplicáveis em escala nacional (Boje *et al.*, 2020; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025), e adapta as soluções às especificidades normativas, institucionais e culturais do contexto brasileiro.

Contribuições Científicas

Do ponto de vista científico, o arcabouço propõe inovação metodológica ao estruturar um protocolo sistematizado em nove fases, cobrindo desde a definição de requisitos e coleta de dados até a validação e escalabilidade nacional. Essa perspectiva preenche uma lacuna reconhecida na literatura internacional, que frequentemente se limita a modelos conceituais ou

experimentais, sem diretrizes operacionais aplicáveis ao patrimônio cultural (ICCROM, 2016; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025).

A integração multidimensional representa outro avanço. O modelo combina dimensões tecnológicas - como H-BIM, SIG, IoT, RA/RV - com dimensões semânticas e metodológicas de governança de dados. A incorporação de ontologias de referência, como o CIDOC-CRM, o *Industry Foundation Classes* (IFC) e o *Building Topology Ontology* (BOT), garante a interoperabilidade semântica e a rastreabilidade dos dados, aspectos fundamentais destacados por Barzaghi *et al.* (2025) e Felicetti e Niccolucci (2025).

Por fim, o arcabouço propõe a criação de um protocolo replicável, com potencial de se tornar uma referência nacional para o registro documental e o monitoramento digital de bens culturais edificados tombados e outras edificações valoradas. Essa iniciativa responde à necessidade de padronização e eficiência técnica de ferramentas de informação, fiscalização e gestão da conservação, aliando levantamentos de patologias e danos à agilização de soluções projetuais (representação e documentação) de intervenções preventivas, fomentando sustentabilidade institucional identificada por Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) e Wang *et al.* (2025), ao mesmo tempo, pretende-se ampliar o escopo internacional da pesquisa ao propor um modelo adaptável a países latino-americanos que enfrentam desafios semelhantes em infraestrutura normativa e tecnológica.

Assim, as contribuições científicas de um modelo brasileiro proposto não se limitam à transferência de tecnologia, mas propõem uma articulação integradora e contextualizada, que une inovação metodológica, interoperabilidade semântica e sustentabilidade científica - consolidando uma base teórico-prática inédita para a aplicação de gêmeos digitais no patrimônio cultural.

Contribuições Sociais e Culturais

As contribuições sociais e culturais do arcabouço proposto estão centradas na redefinição do papel dos HDTs como instrumentos de mediação, participação e valorização cultural - superando a visão puramente técnica predominante em grande parte da literatura internacional (Shang *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025). O modelo brasileiro propõe, assim, um ecossistema digital vivo, no qual a tecnologia atua como meio de democratização do acesso ao patrimônio, de fortalecimento das identidades locais e de fomento à economia criativa.

A primeira contribuição refere-se à educação patrimonial, ao transformar dados técnicos e científicos - provenientes de levantamentos multiespectrais, modelagens H-BIM e sistemas IoT - em experiências acessíveis e interativas. Por meio de recursos de RA/RV e jogos sérios, os HDTs tornam-se plataformas de aprendizagem imersiva, aproximando o público dos atributos e valores culturais reconhecidos, dos processos de salvaguarda de acervos monumentais (e conjuntos), inclusive das "boas práticas de conservação" dos bens tombados e edificações valoradas. Esta perspectiva está em consonância com os princípios da semiótica educacional (Duval, 2006; Eco, 1976), que

reconhece o papel dos múltiplos registros de representação na construção do conhecimento. Além disso, dialoga com experiências recentes que aplicam RA/RV no patrimônio como ferramentas de interpretação cultural e engajamento social (Boboc *et al.*, 2022; Capecchi *et al.*, 2024).

A segunda contribuição é o engajamento comunitário, concebido como eixo estruturante da sustentabilidade social dos HDTs. O arcabouço propõe a participação ativa das comunidades locais nas etapas de coleta (inventários participativos e "significância"), interpretação e difusão dos dados, garantindo representatividade cultural, pertencimento identitário e inclusão social. Essa dimensão responde à crítica de Felicetti, Himmiche e Somenzi (2025) sobre o risco de centralização tecnológica e viés cultural em projetos patrimoniais digitais. No modelo brasileiro, a comunidade é reconhecida não apenas como fonte de informação, mas como coprodutora de conhecimento patrimonial dialogado e reconstrutivo, consolidando uma governança participativa dos dados e das narrativas culturais e identitárias locais (vivências e resgates histórico-culturais junto aos acervos dos conjuntos arquitetônicos, urbanísticos e paisagísticos tombados).

Por fim, destaca-se o potencial para o turismo inteligente, em que os HDTs funcionam como infraestruturas digitais para a gestão e valorização do patrimônio em rede. As tecnologias integradas - SIG, RA/RV e *storytelling* digital - permitem o desenvolvimento de roteiros turísticos interativos e experiências imersivas baseadas em dados reais e simulações virtuais. Esse componente conecta os objetivos de conservação aos de desenvolvimento econômico sustentável, em linha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 8, 11 e 17) e com abordagens recentes sobre a economia criativa aplicada ao patrimônio (Barzaghi *et al.*, 2025; Guo *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025).

Assim, ao articular educação, participação e sustentabilidade cultural, o arcabouço amplia o escopo tradicional dos gêmeos digitais e redefine seu papel como infraestruturas cognitivas e sociais, voltadas à inclusão, à diversidade e à valorização do patrimônio enquanto bem coletivo.

Contribuições Econômicas

As contribuições econômicas do arcabouço em nove fases estão associadas à consolidação de um modelo de gestão sustentável do patrimônio, no qual os HDTs não apenas preservam, mas também geram valor econômico, social e cultural. Essa dimensão amplia significativamente o escopo dos estudos internacionais, que ainda concentram seus esforços nas etapas técnicas de modelagem e diagnóstico (Boje *et al.*, 2020; Sugiyama; Bourgeois; Rodrigues, 2025), deixando em segundo plano a integração entre tecnologia, economia e políticas de valorização cultural.

A primeira contribuição diz respeito à redução de custos de manutenção, alcançada por meio do uso de sensores IoT, séries temporais e algoritmos de inteligência artificial. Essas ferramentas permitem antecipar anomalias estruturais e ambientais, possibilitando a manutenção preditiva e a alocação

mais eficiente de recursos. Trabalhos como os de Guo *et al.* (2024), Wang *et al.* (2025) e Pavlidis (2025) demonstram o impacto direto do monitoramento inteligente na economia de recursos operacionais, validando a aplicabilidade de modelos digitais como instrumentos de planejamento e tomada de decisão.

A segunda contribuição está relacionada à sustentabilidade econômica do sistema patrimonial. O arcabouço incorpora modelos de financiamento híbridos, que combinam fontes públicas, privadas e internacionais, bem como estratégias de autossustentação baseadas em produtos e serviços derivados dos HDTs. Essa dimensão se alinha às recomendações da UNESCO (2011) e dos três órgãos consultivos da Convenção do Patrimônio Mundial: ICCROM (2016), ICOMOS (2008, 2011) e IUCN (2008), que reconhecem a sustentabilidade financeira como um dos pilares para a preservação patrimonial. Além disso, a inclusão de uma camada de governança digital federada, com participação de múltiplas instituições e setores, reforça a transparência e a perenidade econômica do modelo (Pavlidis, 2025; Wang *et al.*, 2025).

A terceira contribuição refere-se ao fortalecimento da economia criativa, estimulando o desenvolvimento de produtos digitais e culturais baseados em patrimônio. As aplicações derivadas dos HDTs - como visitas virtuais, experiências imersivas em RA/RV, jogos educativos e plataformas interativas - constituem novas cadeias de valor, capazes de gerar emprego, renda e inovação cultural e participativa. Essa visão está em consonância com a literatura recente sobre turismo inteligente e economia da cultura (Boboc *et al.*, 2022; Felicetti; Himmiche; Somenzi, 2025), bem como com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 8, 9 e 11), que enfatizam o papel da cultura como vetor de crescimento inclusivo e sustentável.

Ao combinar fundamentos científicos, práticas culturais e estratégias econômicas, o arcabouço proposto posiciona-se como uma infraestrutura cognitiva e integradora voltada à preservação e valorização do patrimônio no Brasil. Sua contribuição transcende a documentação digital e a gestão técnica, configurando-se como um modelo de inovação social e econômica. Nesse sentido, o Observatório não apenas promove a conservação do patrimônio material, mas também atua como plataforma estratégica para políticas públicas inclusivas, educação integrada no campo técnico e cultural da identificação, registro, reconhecimento e conservação do patrimônio e economia cultural, com potencial de impacto nacional e replicabilidade internacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresenta uma proposta metodológica inédita para o desenvolvimento de Gêmeos Digitais Patrimoniais, estruturada em um arcabouço conceitual de nove fases que articula dimensões tecnológicas, semânticas, normativas e socioculturais. A metodologia integra H-BIM com tecnologias de ponta - SIG, IoT, IA, RA/RV - com ontologias patrimoniais (CIDOC-CRM, IFC, BOT), configurando uma infraestrutura digital cognitiva voltada à identificação de patologias e danos, à conservação preventiva (dentro

das "boas práticas de conservação"), à gestão da conservação baseada em risco e à valorização cultural do patrimônio brasileiro.

A proposta diferencia-se por sua abordagem holística e integradora, superando a fragmentação metodológica observada nas iniciativas internacionais. Ao invés de concentrar-se em etapas isoladas - como documentação, diagnóstico ou simulação -, o arcabouço organiza um ciclo completo de desenvolvimento e aplicação, que vai desde a definição de requisitos e protocolos nacionais (Fase 1) até a validação e escalabilidade em nível territorial (Fase 9). Cada fase é estruturada para garantir rastreabilidade, interoperabilidade e aplicabilidade prática, respeitando a complexidade e diversidade do patrimônio cultural brasileiro.

O modelo do ponto de vista científico, apresenta uma estrutura metodológica sistematizada e replicável, que pode servir de base para a formulação de políticas públicas e para a criação de um Protocolo Nacional de Documentação e Monitoramento Digital de Bens Tombados. Essa padronização é essencial para enfrentar um dos principais desafios identificados na literatura - a ausência de fluxos metodológicos consolidados e adaptados aos contextos institucionais e tecnológicos da América Latina.

Sob o âmbito técnico e operacional, o modelo remete à integração entre documentação geométrica, modelagem paramétrica, dados de sensoriamento em tempo real e governança digital federada. Essa combinação permite a construção de infraestruturas cognitivas vivas, capazes de apoiar a manutenção preditiva e o planejamento territorial sustentável, ao mesmo tempo em que fortalecem a transparência, a interoperabilidade e o uso responsável dos dados.

Na perspectiva social e cultural, tem-se a reconfiguração dos HDTs como plataformas de mediação cultural e educação patrimonial, que pode promover a participação das comunidades locais no processo de coleta, interpretação e difusão de informações sobre o patrimônio cultural edificado. Ao incluir fases específicas de mediação, turismo inteligente e economia criativa, o modelo amplia a função tradicional dos gêmeos digitais, que deixam de ser ferramentas restritas a especialistas e passam a ser instrumentos de inclusão, fruição e engajamento coletivo.

Sob a ótica econômica, o modelo caracteriza-se como sustentável de gestão da conservação e difusão patrimonial, articulando financiamento híbrido, transferência tecnológica e economia criativa. O uso de tecnologias imersivas, gamificação e produtos culturais digitais demonstra o potencial dos HDTs como vetores de inovação e geração de valor, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 8, 9, 11 e 17) e às diretrizes internacionais de preservação como as propostas pela UNESCO.

Embora o modelo ainda se situe no campo teórico, suas bases conceituais e estruturais fornecem um caminho sólido para futuras validações empíricas, que poderão ser conduzidas em conjuntos e monumentos tombados representativos de diferentes tipologias e contextos geográficos, inclusive

edificação excepcionais valoradas. As etapas propostas, quando aplicadas em escala piloto, permitirão avaliar a maturidade tecnológica, a interoperabilidade semântica e a viabilidade econômica do modelo.

Como próximos passos, propõe-se a implementação de um plano de trabalho voltado à validação prática em diferentes tipologias de bens tombados - incluindo edificações religiosas barrocas, estruturas modernistas e sítios urbanos de valor histórico. Inicialmente, serão selecionados três casos-piloto em diferentes regiões do Brasil. O cronograma estimado para 24 meses contempla uma fase preparatória, seguida por execução técnica, validação e ajustes. Os indicadores de sucesso incluirão: a) grau de interoperabilidade técnica dos modelos H-BIM/SIG; b) índice de confiabilidade metrológica nas digitalizações; c) participação comunitária nos processos de mediação cultural; d) redução de custos operacionais por meio da manutenção preditiva baseada em sensores IoT; e e) viabilidade econômica das soluções aplicadas.

Em síntese, a propostas metodológica para um Observatório Nacional do Patrimônio Cultural representa um avanço metodológico e técnico de alcance cultural para o campo dos gêmeos digitais no patrimônio, ao articular ciência, tecnologia e cultura em um sistema cognitivo vivo. Sua adoção poderá contribuir para a consolidação de uma política pública de digitalização e conservação patrimonial sustentável, promovendo um novo paradigma de gestão integrada e participativa do patrimônio cultural brasileiro.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Construção de edificação**: organização de informação da construção: parte 2: estrutura para classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. **Sistema de classificação da informação da construção**: parte 1: terminologia e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ADAMOPOULOS, E. *et al.* Multispectral sensing and data integration for the study of heritage architecture. **Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 64, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ecsa-7-08198>.

ARMIJO, A.; ZAMORA-SÁNCHEZ, D. Integration of railway bridge structural health monitoring into the internet of things with a digital twin: a case study. **Sensors**, v. 24, n. 7, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24072115>.

BARZAGHI, S. *et al.* From metadata to storytelling: a framework for 3D cultural heritage visualization on RDF data. **ArXiv**, v. 1, May 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.14328>.

BHATTA, S.; DANG, J. Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: a state-of-the-art review. **Urban Lifeline**, v. 2, n. 17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44285-024-00031-2>.

BOBOC, R. G. *et al.* Augmented reality in cultural heritage: an overview of the last decade of applications. **Applied Sciences**, v. 12, n. 19, p. 9859, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199859>.

BOJE, C. *et al.* Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, p. 103179, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.

BRUMANA, R.; IOANNIDES, M.; PREVITALI, M. Holistic Heritage Building Information Modelling (HHBIM): from nodes to hub networking, vocabularies and repositories. *In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES. Proceedings [...]. [S. l.], 2019. v. 42. p. 309-316. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2/W11-309-2019.*

CAPECCHI, I. *et al.* Augmented reality and serious game to engage the alpha generation in urban cultural heritage. **Journal of Cultural Heritage**, v. 66, p. 523-535, Mar./Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.004>.

DORE, C.; MURPHY, M. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites. *In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, 18., 2012, Milan. **Proceedings [...]. Milan: [s. n.], 2012. p. 613-619, 2012.** Disponível em: <https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1072&context=beschrecon>. Acesso em: 26 out. 2025.

DUVAL, R. A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. **Educational Studies in Mathematics**, v. 61, n. 1-2, p. 103-131, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10649-006-0400-z>. Acesso em: 30 out. 2025.

ECO, H. **A theory of semiotics**. Bloomington: Indiana University Press, 1976.

FELICETTI, A.; HIMMICHE, A.; SOMENZI, M. Knowledge graphs and artificial intelligence for the implementation of cognitive heritage digital twins. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 18, p. 10061, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151810061>.

FELICETTI, A.; NICCOLUCCI, F. Artificial intelligence and ontologies for the management of heritage digital twins data. **Data**, v. 10, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/app151810061>.

FRONER, Y. A. *et al.* Data Collection for Cultural Heritage Risk Management: the Damage Map through Heritage Building Information Modeling (HBIM) Project Applied to the Façade of St Francis of Assisi, Ouro Preto, Brazil. **Studies in Conservation**, v. 69, supl. 1, p. 98-107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2379132>.

GUO, Y. *et al.* Extending X-reality technologies to digital twin in cultural heritage risk management: a comparative evaluation from the perspective of situation awareness. **Heritage Science**, v. 12, n. 245, p. 1-22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01363-6>.

ICCROM. **A guide to risk management of cultural heritage**. Rome: ICCROM, 2016. Disponível em: https://www.iccrom.org/sites/default/files/Guide-to-Risk-Management_English.pdf. Acesso em: 26 out. 2025.

ICOMOS. **Carta ICOMOS para interpretación y presentación de sitios de patrimonio cultural**: preparado bajo los auspicios del comité científico internacional del ICOMOS sobre la interpretación y presentación de sitios de patrimonio cultural Ratificada por la 16ª Asamblea General del ICOMOS. Québec, 2008. Disponível em: https://www.icomos-teoria.org/_files/ugd/eff5d8_1ea8e303ef164866a5451064d0816942.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

ICOMOS. **Guidance on heritage impact assessments for Cultural World Heritage properties**. Paris: ICOMOS, 2011.

IUCN. **Management planning for natural world heritage properties**: a resource manual for practitioners. Gland, Switzerland: IUCN Programme on Protected Areas, 2008. Disponível em: <http://cmsdata.iucn.org/downloads/whmanagement.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

IPEA. **Agenda 2030**: objetivos de desenvolvimento sustentável: avaliação do progresso das principais metas globais para o Brasil: ODS 11: tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Brasília, DF: Ipea, 2024. (Cadernos ODS, 11). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/ri2024ODS11>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MOROPOULOU, A. *et al.* Multispectral applications of infrared thermography in the diagnosis and protection of built cultural heritage. **Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 284, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8020284>.

MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic Building Information Modelling (HBIM). **Structural Survey**, v. 27, n. 4, p. 311-327, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1108/02630800910985108>.

NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: a review. **Applied Geomatics**, v. 6, p. 1-15, 2014.

PAVLIDIS, G. Agentic ai for cultural heritage: embedding risk memory in semantic digital twins. **Computers**, Basel, v. 14, n. 7, p. 266, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-431X/14/7/266>. Acesso em: 27 out. 2025.

RAMTOHUL, A.; KHEDO, K. K. Augmented reality systems in the cultural heritage domains: a systematic review. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 32, e00317, Mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00317>.

SHANG, X. *et al.* Behavioral model construction of architectural heritage for digital twin. **Heritage Science**, v. 13, n. 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s40494-025-01691-1>. Acesso em: 26 out. 2025.

SUGIYAMA, G.; BOURGEOIS, I.; RODRIGUES, H. A holistic methodology for the assessment of heritage digital twin applied to portuguese case studies. **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**, v. 36, e00390, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00390>.

TAKE BIM Processes to the next level with Digital Twins. **Building SMART**, c2025. Disponível em: <https://www.buildingsmart.org/take-bim-processes-to-the-next-level-with-digital-twins/>. Acesso em: 30 out. 2025.

TEJEDOR, B. *et al.* Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and future perspectives. **Energy and Buildings**, v. 263, p. 112029, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112029>.

UNESCO. **World Heritage Convention and sustainable development**. Paris, 2011. Disponível em: <http://whc.unesco.org/archive/2011/whc11-35com-5Ee.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

WANG, G. *et al.* Research on value-chain-driven multi-level digital twin models for architectural heritage. **Buildings**, v. 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15172984>.

José Edeson de Melo Siqueira: Doutor em Educação Matemática e Tecnológica (Universidade Federal de Pernambuco - UFPE). Docente da UFPE, onde atua no Departamento de Expressão Gráfica. Lidera e participa de projetos de pesquisa, desenvolvimento e extensão voltados aos artefatos FiGitAis. Suas contribuições alinham-se às competências STEAM+C e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Max Lira Veras Xavier de Andrade: Doutor em Engenharia Civil (Universidade de Campinas/TECHNION University - Unicamp). Docente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde atua no Departamento de Expressão Gráfica. Atualmente é Coordenador da Célula BIM UFPE e da Especialização em BIM da UFPE. Investiga a aplicação do BIM em modelos de projeto arquitetônicos digitais.

André Gustavo da Silva Bezerra Lins: Doutor em Arquitetura e Urbanismo (Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - FAU/USP). Pós-Doutorado em Desenvolvimento Urbano (Universidade Federal de Pernambuco - UFPE). Atua como arquiteto e urbanista servidor federal efetivo do Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional (IPHAN). Participa de projetos de intervenções em bens culturais tombados.

Francisco Luiz dos Santos: Doutor em Física da Matéria Condensada (Universidade Federal de Pernambuco - UFPE). Docente da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), onde atua no Departamento de Física. Desenvolveu pesquisas em modelagem e simulação computacional de sistemas complexos. Atua na aproximação China-Brasil, com projetos vinculados à Rota da Seda alternativa, como o de robótica Humanoide no âmbito dos BRICs.

Sílvio de Barros Melo: Doutor em Ciência da Computação (Arizona State University). Docente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde atua no Centro de Informática. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Processamento Gráfico nos seguintes temas: CAGD, Impressão 3D, Reconstrução tomográfica, modelagem de dados desestruturados e realidade aumentada.

Murilo Artur Araújo da Silveira: Doutor em Comunicação e Informação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Docente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde atua no Departamento de Ciência da Informação. Diretor do Centro de Artes e Comunicação (UFPE). Tem experiência nas áreas de: bibliometria, cienciometria, representação da informação, indicadores científicos, estudos de citações, documentação e memória social.

Daniela Eugênia Moura de Albuquerque: Doutoranda e Mestre em Ciência da Informação (Universidade Federal de Pernambuco - UFPE). Pesquisadora na área da Memória da Informação Científica e Tecnológica. Tem experiência nas áreas: biblioteconomia dos livros raros, patrimônio cultural, memória coletiva, bibliotecas universitárias, desenvolvimento de coleções, patrimônio documental, tráfico ilícito de bens culturais e normalização documentária.

Texto recebido em: 14/11/2025

Texto aprovado em: 07/01/2026