# INTEGRAÇÃO BIM-GIS-IA NO GERENCIAMENTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

## BIM-GIS-AI Integration in Operation and Maintenance Management: A Literature Review

**Tharlys Hikaro Pinheiro Silva**
Universidade de Brasília | Brasília, DF | tharlys.hikaro@gmail.com

**Michele Tereza Marques Carvalho**
Universidade de Brasília | Brasília, DF | micheletereza@unb.br

## RESUMO

A operação e manutenção de ativos da construção civil têm evoluído com a adoção de tecnologias digitais, como o Building Information Modeling (BIM), o Geographic Information System (GIS) e a Inteligência Artificial (IA). Embora avanços em integrações parciais (BIM-GIS, BIM-IA, GIS-IA) sejam observados, a literatura ainda carece de abordagens integradas que combinem as três tecnologias em fluxos padronizados voltados para inspeção e manutenção de ativos. Este estudo realizou uma revisão sistemática da literatura, complementada por análise bibliométrica e qualitativa, para mapear o estado da arte da integração BIM-GIS-IA com foco na identificação de fissuras e defeitos para manutenção de ativos da construção civil. A metodologia seguiu as diretrizes PRISMA, com busca de artigos na base Scopus, aplicação de critérios de elegibilidade e análise por meio do software VOSviewer. Os resultados indicaram tendências como a utilização de drones, técnicas de aprendizado profundo e integração com gêmeos digitais, mas também evidenciaram desafios de interoperabilidade e robustez dos modelos de IA. O estudo sistematiza as contribuições recentes da literatura, destaca lacunas relevantes e aponta direções para o desenvolvimento de soluções mais integradas no apoio à gestão de ativos.

**Palavras-chave:** *Building Information Modeling*; *Geographic Information System*; Inteligência Artificial; Operação e Manutenção; Inspeção Automatizada.

## ABSTRACT

*The operation and maintenance of assets in the construction sector have evolved with the adoption of digital technologies such as Building Information Modeling (BIM), Geographic Information Systems (GIS), and Artificial Intelligence (AI). Although significant advances have been achieved in partial integrations (BIM-GIS, BIM-AI, GIS-AI), the literature still lacks comprehensive approaches that combine these three technologies into standardized workflows for asset inspection and maintenance. This study conducted a systematic literature review, complemented by bibliometric and qualitative analysis, to map the state of the art of BIM-GIS-AI integration with a focus on crack and defect detection for maintenance of construction assets. The methodology followed the PRISMA guidelines, with article searches performed in the Scopus database, application of eligibility criteria, and analysis using VOSviewer software. The results indicated emerging trends such as the use of drones, deep learning techniques, and integration with digital twins, while also highlighting challenges of interoperability and AI model robustness. The study systematizes recent contributions from the literature, highlights relevant gaps, and outlines directions for the development of more integrated solutions to support asset management.*

**Keywords:** Building Information Modeling; Geographic Information System; Artificial Intelligence; Operation and Maintenance; Automated Inspection.

# 1 INTRODUÇÃO

A operação e manutenção (O&M) de ativos da construção civil têm sido facilitadas e aprimoradas por ferramentas digitais, visando garantir durabilidade, segurança e eficiência. Abordagens como Building Information Modeling (BIM), Geographic Information System (GIS) e Inteligência Artificial (IA) transformam práticas tradicionais ao integrar dados espaciais, modelagem informacional e processos automatizados de inspeção e monitoramento (Wei *et al*., 2021). A integração BIM-GIS proporciona a associação entre geometrias detalhadas e contexto geográfico, enquanto a aplicação da IA permite a detecção automática de anomalias, como fissuras e defeitos em estruturas (Huang; Ninić; Zhang, 2021).

A relevância dessa integração evidencia-se ao contrastá-la com os desafios da O&M tradicional, frequentemente marcada por processos reativos, custos elevados e informações fragmentadas (Daulat *et al*., 2022; Sandu; Varganova; Samii, 2022; West *et al*., 2024). A sinergia entre as três tecnologias oferece um paradigma proativo: o BIM atua como um repositório central de informações geométricas e semânticas do ativo; o GIS expande essa visão, contextualizando o ativo em sua localização e em relação à infraestrutura ao redor; e a IA funciona como o motor de análise, processando dados de imagens ou sensores para automatizar a detecção e classificação de anomalias. Os benefícios práticos dessa união são redução de custos, aumento da eficiência operacional, visualização de danos em modelo 3D georreferenciado e o suporte à manutenção preditiva e proativa, culminando na viabilização de gêmeos digitais cognitivos (Abdelalim *et al*., 2025; Meschini *et al*., 2022; Pan; Zhang, 2022).

Apesar dos avanços nas integrações parciais (BIM-GIS, BIM-IA e GIS-IA), a literatura aponta que a integração simultânea das três tecnologias em fluxos estruturados para apoiar a O&M de ativos permanece limitada. Metodologias recentes que combinam drones, aprendizado profundo e modelos BIM, por exemplo, ainda enfrentam limitações pela integração restrita com GIS, o que demonstra como a ausência de fluxos padronizados limita a contextualização espacial dos defeitos (Hu; Yee; Goff, 2024; Tan *et al*., 2022). Essas dificuldades refletem desafios persistentes de interoperabilidade entre formatos como IFC e CityGML, padronização e gerenciamento de grandes volumes de dados sensoriais, resultando em poucos trabalhos que abordam a integração completa dessas tecnologias para a detecção automatizada de anomalias em pontes, pavimentos ou outras estruturas (Cepa *et al*., 2024; Chun; Yamane; Tsuzuki, 2021; Huang; Ninić; Zhang, 2021; Tsaimou *et al*., 2024; Wójcik; Żarski, 2020; Xia *et al*., 2022).

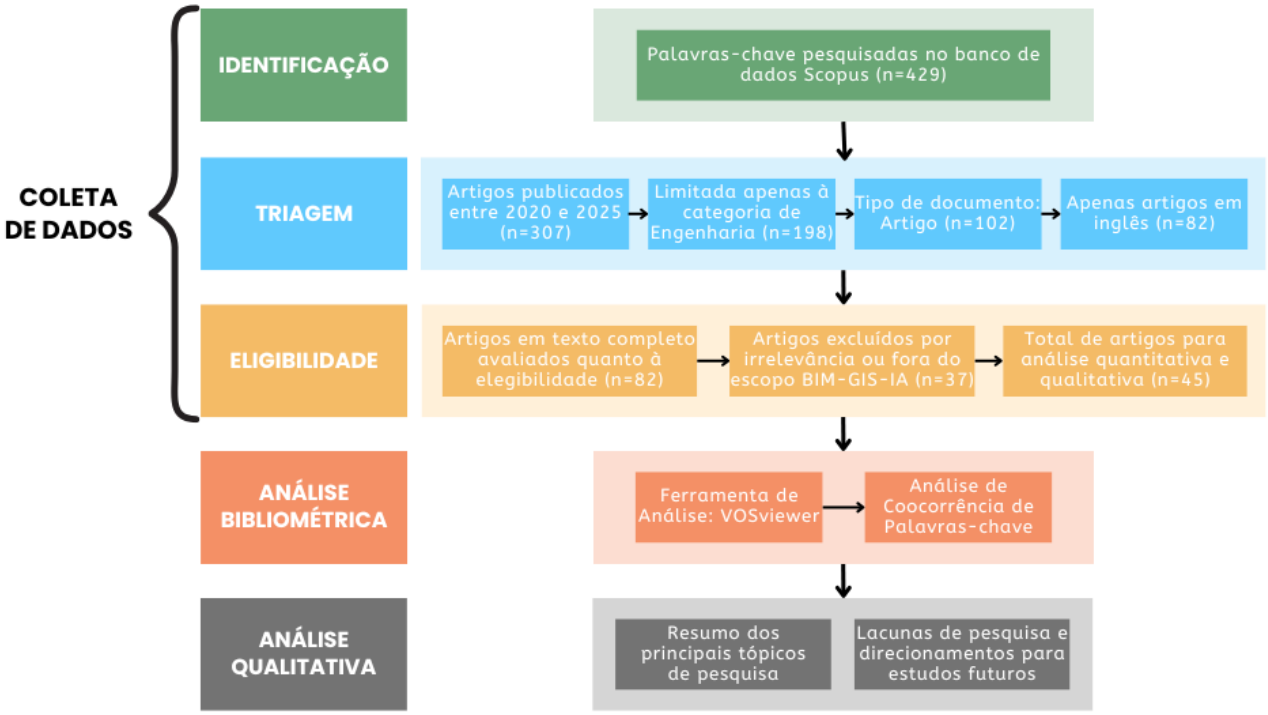
Diante do cenário exposto, que evidencia uma lacuna entre o potencial teórico e a aplicação prática, este estudo se propõe a consolidar o conhecimento disperso na área. Por meio de uma revisão sistemática da literatura, combinada com análise bibliométrica e qualitativa, o objetivo é mapear o estado da arte das integrações BIM-GIS-IA voltadas à O&M. Busca-se, assim, identificar avanços, desafios e tendências para pesquisas futuras, com ênfase na aplicação dessas tecnologias para a identificação de fissuras e defeitos em ativos da construção civil.

# 2 METODOLOGIA

Para compreender aplicações e desafios da integração entre BIM, GIS e IA na O&M de ativos da construção civil, com foco na identificação automatizada de anomalias, esta pesquisa adota abordagem metodológica mista, combinando revisão sistemática da literatura, baseada nas diretrizes PRISMA (Page *et al*., 2021), e análise de mapeamento científico com ferramentas bibliométricas.

A revisão sistemática garantiu a seleção criteriosa dos estudos, enquanto a análise bibliométrica mapeou tendências e contribuições científicas (Liu *et al*., 2025; Ohueri; Masrom; Noguchi, 2024). Essa combinação visou reduzir vieses subjetivos comuns a abordagens exclusivamente qualitativas. O processo de investigação foi estruturado conforme esquematizado na Figura 1 e detalhado a seguir.

**Figura 1**: Metodologia de pesquisa




**Fonte**: Autores.

A coleta de dados iniciou-se com a definição de estratégias de busca em bases eletrônicas. A Scopus foi adotada como base exclusiva pois sua ampla cobertura supera a da Web of Science, e oferece flexibilidade de busca, representatividade global e diversidade temática (Falagas *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2021).

Como a busca inicial para integração BIM-GIS-IA resultou em estudo único, realizaram-se buscas separadas para cada par de integração — BIM-GIS, BIM-IA e GIS-IA — para maior abrangência, permitindo uma análise mais ampla e estruturada da literatura.

As buscas foram reunidas na seguinte string combinada, empregada na Scopus: (("Artificial Intelligence" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "CNN") AND ("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "GIS" OR "Geographic Information System") AND ("image*") AND ("Crack*" OR "Defect*" OR "Damage")) OR (("BIM-GIS" OR ( ( "BIM" OR "Building Information Modeling" ) AND ( "GIS" OR "Geographic Information System"))) AND ("Operation and Maintenance" OR "operation" OR "maintenance" OR "O&M" OR "Facility Management" OR "FM")). A partir dessa busca, encontrou-se 429 documentos.

Após a coleta inicial, aplicou-se uma triagem com base em critérios pré-estabelecidos. Primeiramente, limitou-se o período de publicação de 2020 a 2025, reduzindo o conjunto para 307 documentos. Em seguida, restringiu-se o escopo à área de engenharia, restando 198 documentos. Posteriormente, selecionaram-se apenas documentos do tipo "artigo", diminuindo o total para 102. Por fim, manteve-se apenas textos em inglês, resultando em 82 artigos para a fase subsequente.

Na fase de elegibilidade, títulos, resumos e textos completos dos 82 artigos foram analisados manualmente, visando verificar a aderência ao tema. Foram excluídos os artigos que, embora mencionassem termos como BIM, GIS ou IA, não apresentavam relação direta com a detecção de fissuras ou defeitos na construção civil, tampouco abordavam a integração entre essas tecnologias. Também foram removidos trabalhos focados em outras áreas por se distanciarem do escopo. Após esse refinamento, 37 artigos foram desconsiderados, totalizando 45 para a etapa seguinte da revisão.

A etapa seguinte consistiu na análise bibliométrica dos artigos elegíveis, por meio do software VOSviewer, para mensurar padrões, identificar tendências e mapear o desenvolvimento científico por meio da coocorrência de palavras-chave (Börner; Chen; Boyack, 2005). A análise foi realizada considerando a frequência e coocorrência de palavras-chave extraídas dos artigos, permitindo identificar os principais termos relacionados à integração entre BIM, GIS e IA, bem como áreas temáticas, relações conceituais, tecnologias dominantes e tendências emergentes (Su; Lee, 2010). Esses resultados subsidiaram a estruturação da discussão qualitativa subsequente.

Após a conclusão da análise bibliométrica, foi realizada uma discussão qualitativa para aprofundar a compreensão sobre as potencialidades e formas da integração entre BIM, GIS e IA na O&M de ativos, com

foco na identificação de fissuras e defeitos. Essa etapa explorou as aplicações das integrações BIM-GIS, BIM-IA, GIS-IA e BIM-GIS-IA, além de identificar desafios enfrentados, lacunas na literatura e direções futuras de pesquisa.

A análise qualitativa, enquanto abordagem interpretativa voltada para a compreensão aprofundada dos fenômenos investigados (Paul; Barari, 2022), baseou-se na análise crítica dos 45 artigos selecionados, complementando os achados quantitativos ao oferecer uma leitura mais refinada das relações conceituais, tendências emergentes e possibilidades de evolução do campo, contribuindo para um mapeamento mais completo do estado da arte.

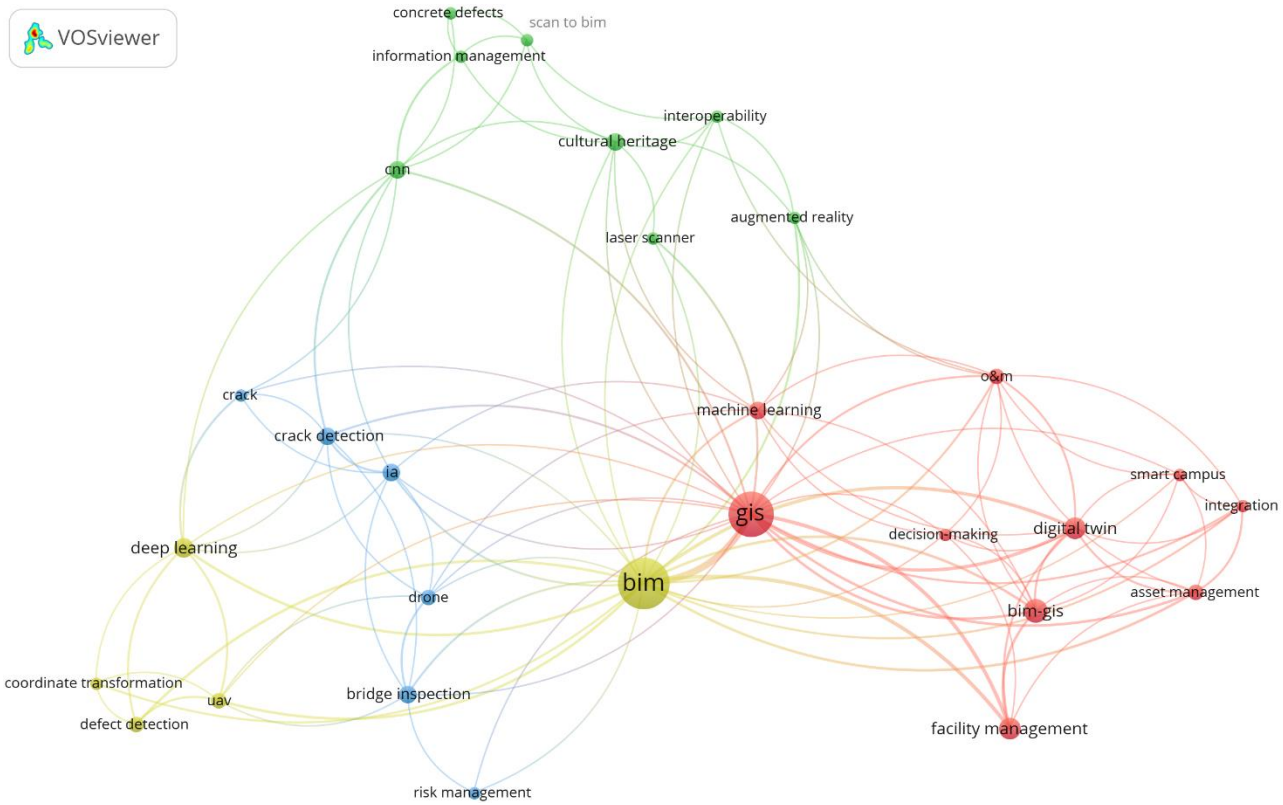
# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados, organizados em análise bibliométrica e qualitativa, subdividida conforme as combinações de integração identificadas: BIM-GIS, BIM-IA, GIS-IA e BIM-GIS-IA.

## 3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

O banco de dados, composto pelos artigos selecionados, foi inserido no VOSviewer, escolhendo-se como unidade de análise as palavras-chave dos autores e o método de contagem total. Palavras semelhantes foram agrupadas, com mínimo de 2 ocorrências. Identificaram-se 29 itens, 4 agrupamentos, 113 ligações e 193 de força de ligação (Figura 2). Cada agrupamento reúne termos vinculados a subtemas recorrentes na integração entre BIM, GIS e IA, refletindo eixos conceituais e inter-relações entre tecnologias, aplicações e campos emergentes.

**Figura 2**: Rede de coocorrência de palavras-chave




**Fonte**: Autores.

O primeiro agrupamento (vermelho) destacou a integração BIM-GIS aplicada à O&M, reunindo termos como *asset management*, *facility management*, *o&m*, *decision-making* e *digital twin*, evidenciando o foco na gestão de ativos e suporte à tomada de decisão em edificações e infraestruturas. A presença de *smart campus* e *integration* reforça a tendência de ambientes inteligentes conectados por dados espaciais. O segundo agrupamento (verde) concentrou palavras relacionadas à digitalização do ambiente construído e interoperabilidade entre plataformas, como *laser scanner*, *scan to BIM*, *information management*, *interoperability* e *augmented reality*, associadas também ao reconhecimento de anomalias estruturais, conforme indicado pela presença de *cnn (*redes neurais convolucionais*)* e *concrete defects*, com aplicações em patrimônio construído (*cultural heritage*). No terceiro agrupamento (azul), destacaram-se termos como

*crack detection*, *bridge inspection*, *drone*, IA e *risk management*, refletindo a aplicação de algoritmos de visão computacional e sensores remotos para inspeções automatizadas e avaliação de riscos, em interface com as frentes GIS-IA e BIM-IA. Por fim, o quarto agrupamento (amarelo) reuniu termos como *deep learning*, *defect detection*, *uav* e *coordinate transformation*, evidenciando a utilização de veículos aéreos não tripulados e técnicas de aprendizado profundo para identificação automatizada de defeitos, fundamentais para o avanço das soluções de inspeção digital.

A análise de coocorrência mapeou a distribuição temática e as conexões entre conceitos ligados à integração BIM, GIS e IA. Além de evidenciar temas consolidados como gestão de ativos e gêmeos digitais, apontou tendências emergentes relacionadas à integração de drones com aprendizado profundo e GIS para inspeções automatizadas, subsidiando a análise qualitativa subsequente.

## 3.2 INTEGRAÇÃO BIM-GIS

A análise dos estudos evidencia a evolução da integração entre BIM e GIS no apoio à O&M de ativos, ampliando a eficiência da gestão de edifícios públicos, patrimônio histórico, redes de utilidades, rodovias e pontes.

As aplicações demonstram que a integração possibilita visualização 3D, análise espacial e associação de informações geométricas e semânticas, com destaque para o uso de dashboards interativos, sistemas de gestão de manutenção e a aplicação de sensores e drones para alimentar modelos digitais (Achuthan *et al*., 2021; Carrasco *et al*., 2024; Ma *et al*., 2020)

Quanto às metodologias de integração, os artigos analisados adotam diferentes abordagens. Parte dos estudos utiliza métodos de ligação leve ou unidirecional, convertendo o modelo BIM (IFC ou RVT) em formatos compatíveis com o GIS, como SLPK, GeoJSON ou CityGML (Cepa *et al*., 2024; Carrasco *et al*., 2024; Sharafat *et al*., 2021). Outros optam por integração bidirecional, permitindo troca dinâmica de dados entre plataformas via API (Interface de Programação de Aplicativos) ou scripts (Congiu *et al*., 2024; Piras; Muzi; Zylka, 2024). Também há propostas de frameworks integrados baseados em banco de dados relacional ou ambientes Web-GIS (Ma *et al*., 2020; Narindri; Nugroho; Aminullah, 2022; Shekargoftar *et al*., 2022). Finalmente, alguns casos (Congiu *et al*., 2023; Lawal; Nawari, 2023; Qian; Leng, 2021) exploram integrações mais avançadas com IoT (*internet of things*), blockchain ou gêmeos digitais, ainda enfrentando limitações de padronização e escalabilidade.

Os resultados indicam benefícios como melhor comunicação entre agentes, automação de verificações, maior confiabilidade nas decisões técnicas e suporte à manutenção preventiva. A conexão entre modelos BIM e dados GIS amplia a gestão, incluindo as relações dos ativos com o ambiente urbano.

Persistem, no entanto, desafios como a falta de interoperabilidade entre formatos (IFC, CityGML, SLPK), limitações na sincronização de dados e a ausência de padronização (Sharafat *et al*., 2021; Tang *et al*., 2022). Muitos estudos ainda dependem de validações manuais para identificação de anomalias ou checagem de medições (Rodrigues *et al*., 2023; Zhan *et al*., 2024) e enfrentam dificuldades na integração de sensores em tempo real (Congiu *et al*., 2023; Shekargoftar *et al*., 2022).

A literatura aponta a necessidade de frameworks padronizados, ontologias comuns e ferramentas interoperáveis para viabilizar o uso contínuo do BIM-GIS na O&M. Meschini *et al*. (2022) sugerem avanços rumo a gêmeos digitais cognitivos (CDT), integrando IoT, IA e ambientes imersivos, ainda em estágio inicial.

## 3.3 INTEGRAÇÃO BIM-IA

A análise evidencia que a integração entre BIM e IA tem se consolidado como suporte à O&M de ativos, promovendo avanços na inspeção automatizada, identificação de defeitos e suporte à decisão, especialmente em pavimentos, pontes, fachadas e edifícios.

Aplicações de IA utilizam arquiteturas de CNN, como Faster R-CNN, YOLO, U²-Net e Dynamic Graph CNN, para detectar defeitos em concreto, estruturas metálicas e componentes construtivos a partir de imagens RGB, drones ou varredura 3D (Bahreini; Hammad, 2024; Cao *et al*., 2024; Gan *et al*., 2023; Hou *et al*., 2024). Após a identificação, os resultados são incorporados aos modelos BIM para registrar o estado dos ativos, apoiar a manutenção e subsidiar a operação.

As metodologias de integração variam significativamente entre os estudos. Alguns utilizam fluxos semi-automatizados, exportando anomalias detectadas em imagens segmentadas, nuvens de pontos ou arquivos JSON, e vinculando-os posteriormente ao modelo BIM (Tan *et al*., 2022; Yang *et al*., 2024). Outros adotam integrações automatizadas, com uso de scripts, APIs ou frameworks que associam diretamente a saída da IA aos elementos BIM por identificadores únicos (Chow *et al*., 2021; Kang; Kim; Kim, 2024; Rodrigues *et al*.,

2022). Musella *et al*., propõem o enriquecimento semântico dos modelos no qual parâmetros geométricos e classificatórios dos defeitos são extraídos e incorporados como propriedades dos elementos modelados.

Os benefícios observados são a redução do tempo de inspeção, maior precisão na detecção de falhas e atualização contínua dos modelos BIM. A integração também impulsiona o desenvolvimento de gêmeos digitais para O&M.

Apesar dos avanços, persistem desafios como a dificuldade de generalizar os modelos de IA para diferentes contextos construtivos (Bahreini; Hammad, 2024; Yang *et al*., 2024), ausência de fluxos padronizados de integração com o BIM (Chow *et al*., 2021; Rodrigues *et al*., 2022) e necessidade de validações manuais para assegurar a qualidade dos registros (Gan *et al*., 2023). Ainda assim, a integração BIM-IA representa uma estratégia promissora para automatizar inspeções, atualizar dinamicamente modelos e apoiar a gestão baseada em dados. Sua consolidação em larga escala exige avanços em bases de treinamento, padronização de fluxos e interoperabilidade entre IA e BIM.

## 3.4 INTEGRAÇÃO GIS-IA

A análise evidencia o potencial da integração entre GIS e IA para apoiar a O&M de ativos, especialmente em tarefas de inspeção e mapeamento de defeitos. Essa combinação permite associar informações espaciais a anomalias detectadas, otimizando a gestão e o planejamento de manutenção.

As aplicações concentram-se no uso de modelos de aprendizado profundo, como ResNet-50, YOLOv8, DeepLabv3+, para detecção de fissuras a partir de imagens de drones e sistemas móveis, integrando os resultados em ambientes GIS para visualização espacial dos danos. Hu, Yee e Goff (2024) propõem um framework para detecção de fissuras em pontes com alta acurácia e geração de ortomosaicos georreferenciados. Dipankar e Suman (2023) desenvolvem abordagem para classificação de trincas em pavimentos e visualização em GIS. Chatzargyros *et al*. (2024) apresenta plataforma web para detecção de falhas em redes elétricas, enquanto Chun, Yamane e Tsuzuki (2021) integra a detecção de fissuras em pavimentos com atualização contínua em GIS.

As metodologias de integração GIS-IA demonstram uma evolução, partindo de abordagens focadas na visualização de anomalias para sistemas de apoio à decisão. As primeiras ocorrem pela sobreposição de camadas vetoriais de defeitos sobre ortomosaicos georreferenciados, permitindo uma análise essencialmente visual (Chun; Yamane; Tsuzuki, 2021; Hu; Yee; Goff, 2024). Em contraste, abordagens posteriores propõem plataformas de gestão em GIS, onde os defeitos são armazenados em bancos de dados espaciais e enriquecidos com atributos (tipo, extensão, localização), possibilitando análises detalhadas e suporte automatizado à priorização de intervenções (Chatzargyros et al., 2024; Dipankar; Suman, 2023).

A integração GIS-IA favorece a automação da inspeção, contribui para maior precisão na detecção de anomalias, amplia a rastreabilidade espacial dos ativos e reduz o tempo e o custo associados às inspeções tradicionais, subsidiando ações de planejamento preventivo mais eficazes. Contudo, ainda persistem desafios, como limitações dos modelos de IA frente a variações de imagem, falta de padronização dos dados integrados, dificuldades de interoperabilidade e necessidade de validações manuais (Chatzargyros *et al*., 2024; Chun; Yamane; Tsuzuki, 2021; Dipankar; Suman, 2023; Hu; Yee; Goff, 2024). Consolidar essa integração exigirá avanços em robustez de métodos, padronização de fluxos e automação da atualização de dados.

## 3.5 INTEGRAÇÃO BIM-GIS-IA

Apenas um estudo abordou a integração simultânea entre BIM, GIS e IA aplicada à O&M de ativos (Gao *et al*., 2024). A análise evidencia o potencial dessa convergência para criar gêmeos digitais dinâmicos e cognitivos voltados à gestão de pontes, permitindo monitoramento em tempo real e análise preditiva de falhas.

O estudo propõe uma metodologia de integração baseada em arquitetura de três camadas — visualização, aplicação e plataforma — que articula dados BIM, GIS e IA de forma coordenada. A camada de visualização emprega WebGIS para exibição geoespacial de defeitos e WebBIM para visualização detalhada de modelos IFC e 3D tiles, uma tecnologia que otimiza a renderização de modelos 3D em larga escala na web, extraídos de digitalizações. A camada de aplicação incorpora algoritmos de aprendizado de máquina para análise dos dados sensoriais, incluindo técnicas de visão computacional para segmentação de defeitos em imagens de drones e classificação automática de anomalias detectadas. A IA é utilizada para detecção de falhas estruturais e previsão da vida útil remanescente dos componentes inspecionados, utilizando aprendizado supervisionado baseado em séries temporais. O fluxo de dados entre BIM e GIS é gerenciado por um ambiente comum de dados (CDE), com informações estruturadas em JSON e vinculadas a objetos do modelo

BIM por identificadores únicos. Modelagens por grafos triplos representam relações espaciais e funcionais entre elementos da ponte, inspeções e rotas alternativas, otimizando o planejamento de manutenção e o gerenciamento emergencial.

Entre os benefícios, destacam-se a atualização dinâmica das condições das infraestruturas, a associação de defeitos a identificadores únicos no BIM georreferenciado no GIS, a previsão e priorização de manutenções e a integração de inspeções automatizadas. Persistem desafios como aprimorar a interoperabilidade entre BIM e GIS, gerenciar grandes volumes de dados sensoriais, ampliar a escalabilidade para redes de ativos e fortalecer a robustez dos modelos de IA, sendo a padronização dos fluxos de dados e a automação da integração pontos críticos para a consolidação dessa abordagem.

Além da estrutura proposta, a integração BIM-GIS-IA pode adotar estratégias modulares, observadas nas frentes BIM-GIS, BIM-IA e GIS-IA, como a conversão de dados BIM para formatos interoperáveis (IFC, CityGML, GeoJSON) e a incorporação de resultados de IA como camadas semânticas no GIS. A utilização de ambientes Web-GIS e Web-BIM com APIs abertas pode viabilizar atualizações incrementais a partir de inferências da IA. Também são viáveis fluxos automatizados em que imagens captadas por sensores são processadas por IA para detecção de defeitos e mapeamento direto no GIS vinculado ao BIM. Modelagens com nuvens de pontos e malhas 3D podem servir como meio geométrico comum, enquanto a IA atua no enriquecimento semântico e na análise preditiva por séries temporais e grafos dinâmicos. Essas alternativas indicam que a integração pode assumir diferentes níveis de complexidade e automação, adaptando-se às necessidades específicas de gestão de ativos.

Do ponto de vista da gestão, a integração completa representa a transição de uma administração de ativos reativa para um modelo preditivo. Ao unificar BIM, GIS e a análise de condição em tempo real (IA), o gestor obtém uma visão holística para a tomada de decisão. Isso permite a priorização de intervenções com base em riscos, a otimização de recursos e uma governança mais eficiente e segura do ambiente construído.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração BIM-GIS-IA é uma abordagem promissora para aprimorar a O&M de ativos da construção civil, permitindo gestão mais eficiente de informações, detecção automatizada de defeitos e contextualização espacial das anomalias.

Neste contexto, este estudo mapeou o estado da arte das integrações entre BIM, GIS e IA aplicadas à O&M de ativos da construção civil, com ênfase na identificação de fissuras e defeitos. A revisão sistemática combinada à análise bibliométrica revelou que, embora as integrações parciais (BIM-GIS, BIM-IA, GIS-IA) estejam em expansão e apresentem resultados promissores, a integração completa das três tecnologias (BIM-GIS-IA) ainda é pouco explorada na literatura. Identificaram-se tendências relevantes, como o uso de drones, técnicas de aprendizado profundo e a incorporação de dados sensoriais para fortalecer os processos de inspeção automatizada e gestão preditiva.

A análise crítica dos artigos evidenciou avanços no suporte à visualização espacial, na atualização dinâmica de modelos BIM com dados de defeitos detectados por IA, e na utilização de plataformas Web-GIS e Web-BIM para gestão de ativos. Entretanto, persistem desafios significativos relacionados à interoperabilidade entre formatos, à padronização de fluxos de dados e à robustez dos modelos de IA em diferentes contextos construtivos.

A principal contribuição deste trabalho é consolidar e sistematizar o conhecimento atual sobre a convergência entre BIM, GIS e IA na O&M, destacando lacunas que precisam ser superadas para viabilizar a adoção prática em larga escala. A superação desses desafios permitirá transformar a gestão de ativos, tornando-a mais inteligente e proativa. Ao reunir e analisar criticamente as abordagens existentes, este estudo oferece subsídios para o desenvolvimento de frameworks mais integrados e padronizados, essenciais para a criação de gêmeos digitais dinâmicos e cognitivos e a transformação digital da gestão de ativos da construção civil.

A integração BIM-GIS-IA pode revolucionar a O&M de ativos, tornando os processos mais precisos e preditivos. Futuras pesquisas devem focar na criação de fluxos interoperáveis e na melhoria dos modelos de IA para identificação de anomalias, o que demanda bases de dados qualificadas, integradas e representativas da diversidade de cenários reais.

## 5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Apoio à Pós-graduação (PROAP) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

## REFERÊNCIAS

ACHUTHAN, K. *et al*. A Digital Information Model Framework for UAS-Enabled Bridge Inspection. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 6017, 22 set. 2021.

BÖRNER, K.; CHEN, C.; BOYACK, K. W. Visualizing knowledge domains. **Annual Review of Information Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 179–255, jan. 2005.

CARRASCO, C. A. *et al*. Methodology for 3D Management of University Faculties Using Integrated GIS and BIM Models: A Case Study. **Buildings**, v. 14, n. 11, p. 3547, nov. 2024.

CEPA, J. J. *et al*. Integrating BIM and GIS for an Existing Infrastructure. **Applied Sciences**, v. 14, n. 23, p. 10962–10962, nov. 2024.

CHATZARGYROS, G. *et al*. UAV Inspections of Power Transmission Networks with AI Technology: A Case Study of Lesvos Island in Greece. **Energies**, v. 17, n. 14, p. 3518–3518, jul. 2024.

CHUN, P.; YAMANE, T.; TSUZUKI, Y. Automatic Detection of Cracks in Asphalt Pavement Using Deep Learning to Overcome Weaknesses in Images and GIS Visualization. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 892, jan. 2021.

CONGIU, E. *et al*. Building Information Modeling and Geographic Information System: Integrated Framework in Support of Facility Management (FM). **Buildings**, v. 14, n. 3, p. 610, mar. 2024.

DAULAT, S. et al. Challenges of integrated multi-infrastructure asset management: a review of pavement, sewer, and water distribution networks. Structure and Infrastructure Engineering, p. 1–20, 9 set. 2022.

DIPANKAR, A.; SUMAN, S. K. Pavement crack detection based on a deep learning approach and visualisation by using GIS. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 24, n. 1, fev. 2023.

FALAGAS, M. E. *et al*. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and Weaknesses. **The FASEB Journal**, v. 22, n. 2, p. 338–342, fev. 2008.

GAO, Y. *et al*. Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by Integrating GIS and BIM. **Buildings**, v. 14, n. 12, p. 3731–3731, nov. 2024.

HU, D.; YEE, T.; GOFF, D. Automated crack detection and mapping of bridge decks using deep learning and drones. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 14, n. 3, p. 729–743, jan. 2024.

HUANG, M. Q.; NINIĆ, J.; ZHANG, Q. B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 108, p. 103677, fev. 2021.

LAWAL, O.; NAWARI, N. O. Blockchain and City Information Modeling (CIM): A New Approach of Transparency and Efficiency. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 28, p. 711–734, 7 nov. 2023.

LIU, X. *et al*. BIM, IoT, and GIS integration in construction resource monitoring. **Automation in Construction**, v. 174, p. 106149, jun. 2025.

MA, Z. *et al*. Data-driven decision-making for equipment maintenance. **Automation in Construction**, v. 112, n. 1, p. 103103, abr. 2020.

MESCHINI, S. *et al*. Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, dez. 2022.

NARINDRI, B. P. K.; NUGROHO, A. S. B.; AMINULLAH, A. Developing Building Management System Framework using Web-based-GIS and BIM Integration. **Civil Engineering Dimension**, v. 24, n. 2, p. 71–84, 3 out. 2022.

OHUERI, C. C.; MASROM, MD. A. N.; NOGUCHI, M. Human-robot collaboration for building deconstruction in the context of construction 5.0. **Automation in Construction**, v. 167, p. 105723, nov. 2024.

PAGE, M. J. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. **British Medical Journal**, v. 372, n. 71, mar. 2021.

PAN, Y.; ZHANG, L. Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 30, 3 nov. 2022.

PAUL, J.; BARARI, M. Meta-analysis and Traditional Systematic Literature reviews—What, why, when, where, and how? **Psychology & Marketing**, v. 39, n. 6, p. 1099–1115, mar. 2022.

PIRAS, G.; MUZI, F.; ZYLKA, C. Integration of BIM and GIS for the Digitization of the Built Environment. **Applied Sciences**, v. 14, n. 23, p. 11171–11171, 29 nov. 2024.

QIAN, Y.; LENG, J. CIM-based modeling and simulating technology roadmap for maintaining and managing Chinese rural traditional residential dwellings. **Journal of Building Engineering**, p. 103248, set. 2021.

RODRIGUES, B. N. *et al*. Digital survey applied to the assessment of pathological manifestations in the architectural heritage of monte alegre in Piracicaba/SP. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 8, n. 1, jun. 2023.

SANDU, G.; VARGANOVA, O.; SAMII, B. Managing physical assets: a systematic review and a sustainable perspective. **International Journal of Production Research**, p. 1–23, 3 out. 2022.

SHARAFAT, A. *et al*. BIM-GIS-Based Integrated Framework for Underground Utility Management System for Earthwork Operations. Applied Sciences, v. 11, n. 12, p. 5721, 20 jun. 2021.

SHEKARGOFTAR, A. *et al*. An Integrated Framework for Operation and Maintenance of Gas Utility Pipeline Using BIM, GIS, and AR. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 36, n. 3, jun. 2022.

SINGH, V. K. *et al*. The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. **Scientometrics**, v. 126, n. 6, p. 5113–5142, mar. 2021.

SU, H.-N.; LEE, P.-C. Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in Technology Foresight. **Scientometrics**, v. 85, n. 1, p. 65–79, jun. 2010.

TAN, Y. *et al*. Mapping and modelling defect data from UAV captured images to BIM for building external wall inspection. **Automation in Construction**, v. 139, p. 104284, jul. 2022.

TANG, L. *et al*. Developing a BIM GIS–Integrated Method for Urban Underground Piping Management in China: A Case Study. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 148, n. 9, set. 2022.

TSAIMOU, C. N. *et al*. Mapping cracks on port concrete pavements by analyzing structural health monitoring metadata with computer vision-based techniques. **Complex Engineering Systems**, v. 4, n. 4, nov. 2024.

WEI, J. *et al*. BIM and GIS Applications in Bridge Projects: A Critical Review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, p. 6207, jul. 2021.

WEST, J. et al. Asset maintenance in Australian commercial buildings. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, 14 jun. 2024.

WÓJCIK, B.; MATEUSZ ŻARSKI, M. Assessment of State-of-the-Art Methods for Bridge Inspection: Case Study. **Arch. Civ. Eng.**, dez. 2020.

XIA, H. *et al*. Study on City Digital Twin Technologies for Sustainable Smart City Design: a Review and Bibliometric Analysis of Geographic Information System and Building Information Modeling Integration. **Sustainable Cities and Society**, v. 84, p. 104009, jun. 2022.

ZHAN, J. *et al*. Maintenance Approaches Using 3D Scanning Point Cloud Visualization, and BIM+ Data Management: A Case Study of Dahei Mountain Buildings. **Buildings**, v. 14, n. 9, p. 2649, ago. 2024.