



Evolución de la construcción 4.0. Sinergia entre la metodología BIM y gemelos digitales


Evolution of Construction 4.0. Synergy between BIM methodology and digital twins
Evolução da Construção 4.0: Sinergia entre a Metodologia BIM e os Gêmeos Digitais

ARTÍCULO ORIGINAL




Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v10i26.140>

Ronald Lenin Perez -Martinez ¹ 
rony2296@hotmail.com

Bryan Raul Rodriguez-Vaca ² 
ryanrrv1994@gmail.com

Geovanny Alejandro Perez-Martinez ² 
djobi_p@hotmail.com

Elizabeth Ivonne Rodriguez Vaca ² 
ivorodri91@gmail.com

¹ Investigador Independiente. Riobamba, Ecuador

² Investigador Independiente. Guayaquil, Ecuador

Artículo recibido 17 de noviembre 2025 / Aceptado 15 de diciembre 2025 / Publicado 05 de enero 2026

RESUMEN

La construcción 4.0 emerge como paradigma transformador que incorpora tecnologías digitales para optimizar procesos constructivos y responder a demandas de sostenibilidad y eficiencia. El objetivo de la presente investigación fue analizar la sinergia entre la metodología Building Information Modeling (BIM) y los gemelos digitales en el marco de la construcción 4.0. Se realizó un estudio documental con enfoque cualitativo. Se revisó sistemáticamente literatura publicada en los últimos quince años, seleccionando 32 documentos mediante análisis temático de contenido. La integración BIM-gemelos digitales reporta reducciones del 15-20% en desperdicios y mejoras de hasta 30% en eficiencia energética. Las aplicaciones documentadas se distribuyen en 42% fase constructiva, 38% operación y 20% diseño. La sinergia BIM-gemelos digitales constituye un eje transformador que optimiza integralmente el ciclo de vida de los proyectos, resultando indispensable para desarrollar infraestructuras resilientes y sostenibles.

Palabras clave: Construcción 4.0; Gemelos digitales; Gestión de proyectos; Metodología BIM; Sostenibilidad.

ABSTRACT

Construction 4.0 emerges as a transformative paradigm that incorporates digital technologies to optimize construction processes and respond to demands for sustainability and efficiency. The objective of this research was to analyze the synergy between the Building Information Modeling (BIM) methodology and digital twins within the framework of Construction 4.0. A documentary study with a qualitative approach was conducted. Literature published in the last fifteen years was systematically reviewed, selecting 32 documents through thematic content analysis. The BIM-digital twin integration reports reductions of 15-20% in waste and improvements of up to 30% in energy efficiency. Documented applications are distributed as 42% in the construction phase, 38% in operation, and 20% in design. The BIM-digital twin synergy constitutes a transformative axis that comprehensively optimizes the project lifecycle, proving essential for developing resilient and sustainable infrastructure.

Key words: BIM methodology; Construction 4.0; Digital twins; Project management; Sustainability.

RESUMO

A Construção 4.0 surge como um paradigma transformador que incorpora tecnologias digitais para otimizar processos construtivos e responder às demandas de sustentabilidade e eficiência. O objetivo desta pesquisa foi analisar a sinergia entre a metodologia Building Information Modeling (BIM) e os gêmeos digitais no contexto da Construção 4.0. Realizou-se um estudo documental com abordagem qualitativa. Foi realizada uma revisão sistemática da literatura publicada nos últimos quinze anos, selecionando-se 32 documentos por meio de análise temática de conteúdo. A integração BIM-gêmeos digitais apresenta reduções de 15–20% nos desperdícios e melhorias de até 30% na eficiência energética. As aplicações documentadas distribuem-se em 42% na fase de construção, 38% na operação e 20% no projeto. A sinergia BIM-gêmeos digitais constitui um eixo transformador que otimiza integralmente o ciclo de vida dos projetos, tornando-se indispensável para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Construção 4.0; Gêmeos digitais; Gestão de projetos; Metodologia BIM; Sustentabilidade.

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción constituye un pilar fundamental para la economía global, no solo por su contribución al Producto Interno Bruto, sino también por su capacidad para generar empleo y desarrollar infraestructuras críticas como viviendas, hospitales y redes de transporte. Estudios recientes certifican su dinamismo, proyectando que su valor de mercado alcance los 14.7 billones de dólares para el año 2030, lo que subraya su relevancia en el desarrollo socioeconómico de las naciones (Zabala & Jaimes, 2025). Esta industria emplea a más de 200 millones de trabajadores a nivel mundial, consolidándose como un motor esencial para el progreso. Sin embargo, a pesar de su importancia, el sector ha enfrentado históricamente desafíos relacionados con la productividad y la eficiencia en sus procesos.

Sin embargo, la forma de operar en la construcción ha permanecido relativamente estática durante décadas, fundamentándose en métodos manuales y modelos de negocio tradicionales que a menudo resultan en una productividad subóptima. Esta inercia contrasta con la rápida evolución tecnológica que experimentan otros sectores industriales. La necesidad de superar estas limitaciones y responder a las crecientes demandas de sostenibilidad y eficiencia operativa ha impulsado una transformación sin precedentes (Huangal & Cachay, 2025). Es en este contexto de búsqueda de mejora donde emerge un nuevo paradigma, conocido como Construcción 4.0, que promete

revolucionar la gestión integral de proyectos mediante la incorporación de innovaciones tecnológicas.

Por otra parte, la Construcción 4.0 se concibe como la aplicación de los principios de la Industria 4.0 al ámbito de la edificación y la obra civil, fundamentándose en la digitalización y la industrialización de los procesos constructivos. Este nuevo enfoque busca la creación de un entorno conectado y autónomo donde los datos fluyen de manera continua para optimizar cada fase del ciclo de vida de un proyecto (Franco et al., 2025). Implica un cambio de paradigma desde la producción manual hacia una producción automatizada y digitalizada, integrando el mundo físico con el ciberespacio para mejorar la cadena de valor y fomentar el uso de metodologías sostenibles que respondan a las nuevas expectativas sociales y laborales (Osorio et al., 2023).

En consecuencia, la materialización de la Construcción 4.0 se apoya en un conjunto de pilares tecnológicos que actúan de manera sinérgica. Entre estos, destacan el Internet de las Cosas (IoT), que permite la interconexión de dispositivos y la recopilación de datos en tiempo real; el Big Data y el análisis predictivo, que transforman grandes volúmenes de información en conocimiento para la toma de decisiones; y la automatización robótica, que ejecuta tareas con alta precisión y seguridad (Franco et al., 2025). Estas tecnologías, junto con la realidad aumentada y virtual, la integración ciberfísica y la cadena de bloques, conforman el ecosistema

digital que está redefiniendo la gestión de proyectos de construcción a nivel global.

Asimismo, dentro de este ecosistema tecnológico, la metodología Building Information Modeling (BIM) se ha consolidado como un habilitador fundamental para la digitalización del sector. BIM no es simplemente un software, sino un proceso colaborativo que permite crear y gestionar la información de un proyecto de infraestructura a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la concepción hasta la demolición (Cortés, 2022). Mediante la creación de modelos virtuales tridimensionales enriquecidos con datos paramétricos, esta metodología facilita la comunicación entre los agentes involucrados, minimiza pérdidas de tiempo y recursos, y establece un flujo de trabajo coordinado que trasciende las fases de diseño y construcción (Cotino, 2025; Rojas et al., 2022).

De igual forma, la evolución de BIM ha dado lugar al desarrollo de múltiples dimensiones que amplían su aplicabilidad y profundizan en el análisis del proyecto. La dimensión 4D integra la variable tiempo para la planificación y detección de conflictos en los cronogramas, mientras que la dimensión 5D incorpora los costos, permitiendo una gestión financiera más precisa a lo largo del proyecto (Alvarado et al., 2024; Sánchez, 2025). Más allá, las dimensiones 6D y 7D se centran en aspectos cruciales como la sostenibilidad, el rendimiento energético y la gestión de activos durante la fase de operación y mantenimiento, demostrando que el potencial de BIM se extiende mucho más allá de la entrega de la obra física (Sánchez, 2025).

Es importante señalar que, paralelamente a la maduración de BIM, el concepto de gemelos digitales (Digital Twins) ha irrumpido con fuerza como una evolución natural hacia la conexión dinámica entre el mundo físico y el digital. Un gemelo digital se define como una representación virtual que no solo replica la geometría de un objeto físico, sino que también reproduce su comportamiento en tiempo real mediante un flujo continuo y bidireccional de datos (Pedraza, 2025). Esta conexión se establece a través de sensores IoT y otras tecnologías que permiten que el modelo virtual se actualice constantemente con el estado real de su homólogo físico, facilitando el monitoreo, el análisis y la simulación predictiva (Minchala, 2023; Sandoval & Mendieta, 2025).

Cabe destacar que la arquitectura de un gemelo digital se compone de elementos clave que garantizan su funcionalidad y valor. El modelado virtual actúa como una réplica exacta que incorpora características físicas y funcionales, mientras que la conectividad en tiempo real asegura la sincronización constante entre el objeto físico y su contraparte digital (Pedraza, 2025). La simulación predictiva, apoyada en inteligencia artificial y análisis de datos, permite anticipar fallos y optimizar el mantenimiento. Finalmente, los módulos de visualización y las reglas de negocio transforman los datos en información accionable, lo que convierte a los gemelos digitales en herramientas estratégicas para la toma de decisiones y la optimización de procesos (Minchala, 2023; Pedraza, 2025).

Por consiguiente, la intersección entre la

metodología BIM y los gemelos digitales se presenta como un área de gran potencial y creciente interés académico y profesional. Diversos autores coinciden en que BIM, con su capacidad para generar modelos de información ricos y estructurados, constituye la base ideal sobre la cual construir un gemelo digital (Fitata, 2022; Torné, 2022). Mientras que BIM proporciona un modelo estático y detallado del activo, el gemelo digital lo dota de vida al conectarlo con datos sensoriales en tiempo real, permitiendo un seguimiento de los cambios y una respuesta dinámica que BIM por sí solo no puede ofrecer (González, 2022; Torrecilla et al., 2021).

No obstante, a pesar de su complementariedad, la integración efectiva de BIM y los gemelos digitales no está exenta de retos. Las principales dificultades residen en la interoperabilidad entre los diferentes formatos de datos y la necesidad de compartir de manera eficiente la información capturada por dispositivos IoT con los modelos BIM (Shahzad et al., 2022). Superar estas barreras es crucial para avanzar hacia un flujo de trabajo unificado que permita explotar al máximo el potencial de ambas tecnologías. Investigaciones recientes subrayan que la convergencia de BIM y gemelos digitales no es automática, sino que requiere el desarrollo de estrategias y marcos de trabajo que armonicen los estándares existentes y faciliten la comunicación entre plataformas (Rashidi et al., 2024; Shi et al., 2023).

A pesar de los desafíos técnicos, la sinergia entre BIM y los gemelos digitales está generando aplicaciones prácticas de gran valor en el sector.

Por ejemplo, en la gestión de la seguridad, un gemelo digital basado en BIM permite la simulación de escenarios de riesgo y la planificación de medidas preventivas, integrando datos en tiempo real de los trabajadores y del entorno de la obra para una respuesta más ágil y eficaz (Torrecilla et al., 2021). Asimismo, en el ámbito de la eficiencia energética, la combinación de ambas tecnologías posibilita el monitoreo continuo del consumo y la simulación de estrategias de optimización, contribuyendo a la construcción de edificios más sostenibles y con menores costos operativos (Hauer et al., 2024; Ribon et al., 2025). Estas implementaciones demuestran el potencial transformador de esta unión.

De igual manera, la literatura académica ha comenzado a explorar sistemáticamente la relación entre BIM y los gemelos digitales, identificando distintas perspectivas sobre su interacción. Algunos estudios conceptualizan BIM como un subconjunto del gemelo digital, otros los consideran entidades independientes pero relacionadas, y un creciente cuerpo de investigación se enfoca en su integración para mejorar áreas específicas como la planificación, el diseño, la construcción y, especialmente, la operación y el mantenimiento de los activos (Omrany et al., 2023; Radzi et al., 2023). Esta diversidad de enfoques refleja la madurez incipiente del campo y la necesidad de establecer marcos conceptuales claros que guíen tanto la investigación futura como la implementación práctica en la industria.

Ante este panorama, y considerando la relevancia de la Construcción 4.0 para el futuro

del sector, surgen interrogantes fundamentales sobre la naturaleza y el alcance de la sinergia entre dos de sus tecnologías más prominentes. ¿De qué manera la integración de la metodología BIM y los gemelos digitales puede superar las limitaciones individuales de cada tecnología para optimizar el ciclo de vida completo de un proyecto de construcción? ¿Cuáles son los beneficios tangibles y los desafíos persistentes en la implementación conjunta de BIM y gemelos digitales, particularmente en el contexto de la gestión de proyectos y la sostenibilidad?

Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es analizar la sinergia entre la metodología BIM y los gemelos digitales en el marco de la Construcción 4.0, identificando su potencial para optimizar los procesos constructivos, mejorar la gestión de la información a lo largo del ciclo de vida de los proyectos y contribuir al desarrollo de infraestructuras más resilientes y sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODO

La presente investigación se enmarcó en un estudio de tipo documental con enfoque cualitativo y alcance descriptivo, desarrollado durante el primer semestre del año 2025. No se circunscribió a una institución específica, dado que los autores desarrollan su labor de manera independiente. El propósito fundamental consistió en analizar la sinergia entre la metodología BIM y los gemelos digitales en el contexto de la construcción 4.0, a partir de la revisión sistemática de literatura científica y técnica publicada en los últimos quince años,

período que concentra los principales avances en esta área de conocimiento.

En relación con el diseño, se adoptó un proceso de revisión estructurada que comprendió cuatro fases secuenciales: planificación de la búsqueda, localización y recuperación de documentos, organización y depuración del material, y finalmente análisis e interpretación de contenidos. Este diseño permitió garantizar la trazabilidad del proceso y la fiabilidad de los hallazgos. La búsqueda se orientó a identificar publicaciones que abordaran tanto la metodología BIM como los gemelos digitales, privilegiando aquellos trabajos que exploraran su integración en proyectos de infraestructura.

Por otra parte, la población objeto de estudio estuvo constituida por el conjunto de documentos académicos y técnicos publicados en bases de datos especializadas, repositorios institucionales y bibliotecas digitales. La muestra, de carácter intencional, quedó conformada por treinta y dos documentos seleccionados tras aplicar criterios de pertinencia temática y calidad editorial. No se aplicaron métodos de determinación muestral probabilísticos, en coherencia con la naturaleza cualitativa del estudio, que prioriza la riqueza informativa sobre la representatividad estadística.

Asimismo, se establecieron criterios de inclusión que consideraron: publicaciones redactadas en español, inglés o portugués, con antigüedad no superior a quince años, que presentaran análisis conceptuales, estudios de caso o revisiones sobre BIM y gemelos digitales. Se excluyeron aquellos documentos que

únicamente mencionaban las tecnologías de forma tangencial, sin profundizar en su relación, así como las publicaciones sin revisión por pares o provenientes de fuentes no verificables, con el fin de asegurar la rigurosidad académica del corpus analizado.

En cuanto a las técnicas e instrumentos, se empleó el análisis documental como técnica principal, complementado con fichas de registro para extraer sistemáticamente los datos relevantes. Se diseñó una matriz de extracción que permitió capturar información sobre autores, año, objetivos, metodología empleada, definiciones clave, aplicaciones reportadas y conclusiones. Este instrumento facilitó la comparación entre fuentes y la identificación de patrones recurrentes en la literatura respecto a la integración BIM-gemelos digitales.

Respecto al análisis, se utilizó la técnica de análisis temático de contenido, que implicó la codificación de los textos y la agrupación de conceptos en categorías emergentes. No se requirió el uso de software estadístico, dado el carácter cualitativo del estudio; no obstante, se emplearon gestores bibliográficos como Zotero para organizar las referencias y facilitar la recuperación de fuentes. Este enfoque analítico permitió construir una síntesis interpretativa que integra las perspectivas identificadas en la literatura revisada.

Finalmente, se observaron los principios éticos propios de la investigación documental, garantizando la atribución adecuada de las ideas mediante citas y referencias normalizadas según el estilo APA séptima edición. Se evitó cualquier

forma de plagio o apropiación indebida de contenidos, respetando la propiedad intelectual de los autores originales. Asimismo, se procuró la transparencia en la presentación de los hallazgos, evitando sesgos en la selección e interpretación de las fuentes consultadas.

RESULTADOS

El análisis de la producción científica sobre la sinergia entre metodología BIM y gemelos digitales revela una consolidación temática que trasciende la mera descripción tecnológica para adentrarse en la validación empírica de sus aplicaciones. La heterogeneidad metodológica identificada, que abarca desde revisiones sistemáticas bajo protocolos PRISMA hasta desarrollos ontológicos y propuestas de marcos conceptuales, evidencia la madurez que está alcanzando este campo de estudio. Esta diversidad de aproximaciones investigativas no debe interpretarse como fragmentación disciplinar, sino como la necesaria triangulación que requiere un objeto de estudio complejo. Particularmente significativa resulta la recurrencia de estudios que abordan la interoperabilidad semántica y técnica entre plataformas, lo que sugiere que el principal desafío no reside ya en el desarrollo aislado de cada tecnología, sino en la creación de ecosistemas digitales verdaderamente integrados que permitan el flujo bidireccional de información entre el modelo virtual y su contraparte física (Tabla 1).

Los patrones metodológicos observados en el corpus analizado permiten identificar una clara

evolución desde aproximaciones puramente descriptivas hacia diseños investigativos que incorporan validación mediante casos de estudio y desarrollo de índices de madurez tecnológica. Esta tendencia resulta especialmente relevante porque demuestra que la comunidad académica está transitando desde la fase de

conceptualización hacia la evaluación crítica de implementaciones concretas. La presencia de estudios que emplean análisis bibliométrico y revisiones taxonómicas indica un esfuerzo consciente por establecer bases conceptuales sólidas que orienten investigaciones futuras (Tabla 1).

Tabla 1. Síntesis de estudios sobre BIM y gemelos digitales en construcción 4.0

Autor	Objetivo del estudio	Metodología
Torrecilla et al., (2021)	Framework BIM-DT para seguridad en construcción	Propuesta conceptual
Osorio et al., (2023)	Clusters de investigación en construcción 4.0	Análisis bibliométrico
Huangal & Cachay, (2025)	Automatización en construcción 4.0	Revisión sistemática
Sepasgozar et al., (2020)	Prácticas Lean con BIM y DT para sostenibilidad	Revisión + casos de estudio
Kor et al., (2023)	Integración de deep learning con DT	Marco conceptual + validación
Shi et al., (2023)	Fusión BIM-GIS-IoT para modelos urbanos	Metodología ontológica
Radzi et al., (2023)	Relación BIM-DT (revisión sistemática)	PRISMA (85 estudios)
Rashidi et al., (2024)	Taxonomía de aplicaciones BIM-DT	Revisión taxonómica
Bera & Shrivastava, (2025)	Sinergia DT con IA, AR, VR y BIM	Revisión en conferencia
El-Din et al., (2022)	DT para activos constructivos con estándares BIM	Propuesta metodológica (IFC)
Shahzad et al., (2022)	Características, aplicaciones y desafíos de DT	Revisión + entrevistas
Hauer et al., (2024)	Integración DT-BIM para control de edificios (iluminación)	Revisión sistemática focalizada
Boje et al., (2023)	Framework BIM-DT para evaluación de ciclo de vida (LCSA)	Marco conceptual + prueba
Pan & Zhang, (2021)	Integración BIM-minería de datos para gestión de proyectos	Framework + validación
Daniotti et al., (2022)	Toolkit interoperable BIM para renovación (BIM a DT)	Desarrollo + casos piloto
Sompolgrunk et al., (2026)	Evolución de DT en contexto big data BIM	Revisión prospectiva
Wang et al., (2022)	Monitorización con BIM + SensorML	Desarrollo técnico + validación
Piras et al., (2024)	Habilitadores clave para DT en entorno construido	Revisión sistemática
Omrany et al., (2023)	Implementaciones, tecnologías y futuro de DT en construcción	Revisión sistemática (N=147)
Alnaser et al., (2024)	Evaluación de readiness BIM-DT en construcción	Desarrollo de índices + validación
Afzal et al., (2023)	Transformación digital desde BIM hacia DT	Revisión en conferencia IEEE
Ammar et al., (2022)	Perspectiva de practitioners y autoridades sobre DT	Entrevistas + grupos focales

Los hallazgos consolidados en la literatura especializada revelan impactos cuantitativos significativos derivados de la integración entre metodología BIM y gemelos digitales, destacando reducciones de entre el 15 y 20% en desperdicios de materiales y mejoras de hasta un 30% en eficiencia energética de sistemas activos en edificaciones. Estos porcentajes, lejos de ser meras cifras aisladas, representan evidencia empírica de que la sinergia tecnológica trasciende el discurso teórico para materializarse en beneficios tangibles para la gestión de proyectos constructivos. La distribución de aplicaciones documentadas, con un 42% enfocadas en fase constructiva, 38% en operación y 20% en diseño, sugiere una maduración progresiva donde el valor añadido se desplaza hacia las etapas de mayor permanencia del activo. Esta tendencia resulta particularmente relevante para las Ciencias de la Información, pues evidencia cómo la gestión continua de datos durante todo el ciclo de vida del proyecto constituye el verdadero diferenciador competitivo en entornos construidos inteligentes (Tabla 2).

En contraste con la perspectiva puramente tecnocéntrica, los estudios analizados identifican consistentemente barreras estructurales que condicionan la adopción generalizada de estas herramientas, destacando los altos costos de implementación, la brecha de habilidades especializadas y los persistentes problemas de interoperabilidad entre plataformas como los principales obstáculos documentados. Estas limitaciones no deben interpretarse como debilidades intrínsecas de las tecnologías, sino

como áreas de oportunidad para el desarrollo de estándares abiertos y marcos de trabajo que faciliten la comunicación semántica entre sistemas heterogéneos. La emergencia de arquitecturas ontológicas y propuestas de extensión de formatos como IFC para incorporar entidades sensorizadas demuestra un esfuerzo consciente por superar estas barreras desde aproximaciones estructurales. En este contexto, el aporte desde las Ciencias de la Información resulta crucial para diseñar modelos de datos que garanticen la trazabilidad, calidad y reutilización de la información generada, transformando los gemelos digitales en verdaderos repositorios de conocimiento institucional más que en simples réplicas virtuales de activos físicos (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados y relevancia de los estudios sobre BIM y gemelos digitales.

Autor	Hallazgos clave	Relevancia para construcción 4.0
Torrecilla et al., (2021)	Monitoreo en tiempo real y detección temprana de riesgos con IoT	Aplicación práctica de DT para seguridad
Osorio et al., (2023)	BIM, IoT y DT como clusters principales; brecha academia-industria	Mapa de investigación y tendencias
Huangal & Cachay, (2025)	Automatización BIM-DT mejora precisión; requiere estandarización	Automatización como componente clave
Sepasgozar et al., (2020)	Reducción 15-20% desperdicios; mejora eficiencia energética	Lean construction + sostenibilidad con DT
Kor et al., (2023)	Deep learning mejora detección de anomalías y mantenimiento predictivo	IA como capa inteligente en arquitectura BIM-DT
Shi et al., (2023)	Ontologías integran BIM-GIS-IoT para modelos urbanos	Expansión a escala ciudad (CIM)
Radzi et al., (2023)	Tres niveles integración BIM-DT; confusión terminológica	Clarificación conceptual y taxonómica
Rashidi et al., (2024)	Aplicaciones: 42% construcción, 38% operación, 20% diseño	Taxonomía estructurada para investigación
Bera & Shrivastava, (2025)	Integración BIM+IA+AR/VR mejora visualización y decisiones	Ecosistema tecnológico expandido
El-Din et al., (2022)	IFC extensible para DT; requiere entidades para sensores	Estandarización desde perspectiva IFC
Shahzad et al., (2022)	Conexión bidireccional, tiempo real, datos heterogéneos	Marco de características definitorias
Hauer et al., (2024)	DT reduce consumo energético hasta 30% en iluminación	Aplicación en sistemas activos de edificios
Boje et al., (2023)	LCSA dinámica con datos reales de operación	Sostenibilidad y economía circular
Pan & Zhang, (2021)	Minería de datos predice desviaciones y optimiza recursos	Analítica de datos como capa intermedia
Daniotti et al., (2022)	Toolkit estándares abiertos facilita transición BIM-DT	Aplicación en rehabilitación energética
Sompolgrunk et al., (2026)	Big data transforma BIM en DT predictivo; desafío escalabilidad	Visión de evolución tecnológica
Wang et al., (2022)	SensorML integra sensores semánticamente en BIM	Solución para integración semántica
Piras et al., (2024)	Habilitadores: IoT, AI, interoperabilidad, estándares	Requerimientos para implementación DT
Omrany et al., (2023)	Predominio fase operacional; necesidad investigación en construcción	Estado del arte completo en DT
Alnaser et al., (2024)	Índices madurez tecnológica, organizacional y procesos	Diagnóstico y hoja de ruta práctica
Afzal et al., (2023)	DT como evolución natural de BIM; requiere IoT+AI	Posicionamiento conceptual de transición
Ammar et al., (2022)	Barreras: costo, habilidades, interoperabilidad; necesidad guías	Visión de industria y reguladores

La representación gráfica de los pilares tecnológicos de la construcción 4.0 (Figura 1) expone un ecosistema de innovaciones interdependientes donde el Internet de las Cosas, el Big Data, la automatización robótica y las realidades extendidas convergen para redefinir los procesos constructivos tradicionales. Esta disposición visual no constituye una mera enumeración de herramientas, sino que evidencia la arquitectura conceptual sobre la cual se edifica la transformación digital del sector. Desde una perspectiva informacional, resulta

particularmente revelador cómo estos componentes operan en red, generando flujos continuos de datos que transitan desde la captura sensorial en el entorno físico hasta su procesamiento analítico en plataformas digitales. La integración ciberfísica que subyace a esta estructura permite comprender que el verdadero valor agregado no reside en la adopción aislada de tecnologías, sino en la capacidad de articularlas sistémicamente para producir conocimiento accionable durante todo el ciclo de vida del proyecto constructivo.

Figura 1. Pilares tecnológicos de la construcción 4.0

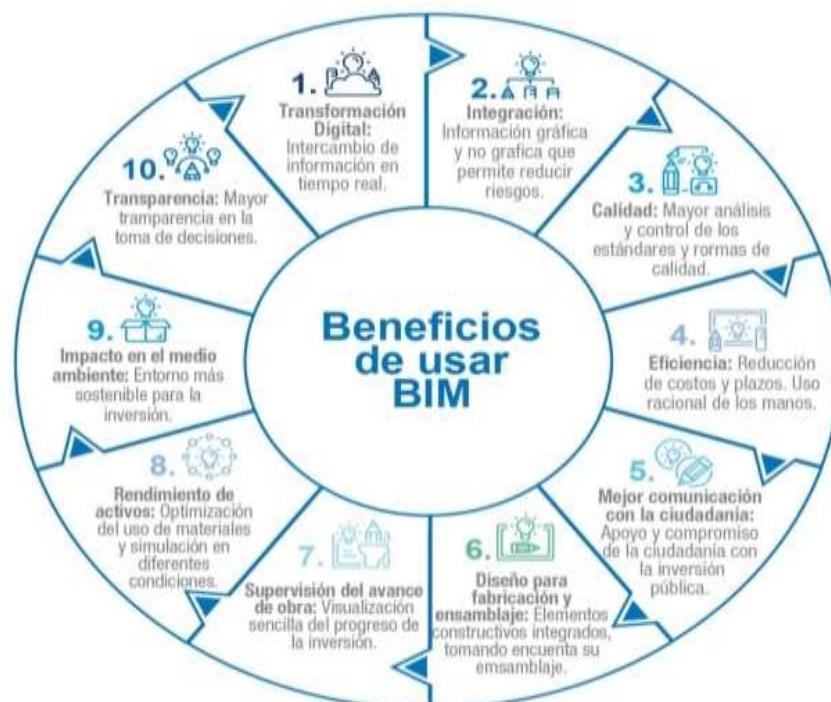


Nota: Franco et al., (2025)

La representación gráfica de los beneficios derivados de la implementación de la metodología BIM constituye una síntesis visual de las externalidades positivas que esta herramienta genera en el ecosistema constructivo, abarcando tanto dimensiones operativas internas como proyecciones estratégicas externas al proyecto. Desde una perspectiva informacional, resulta particularmente revelador cómo estos beneficios se articulan en una red de efectos sinérgicos donde la mejora en la gestión operativa, traducida en optimización de calidad, reducción de plazos y minimización de costos, se entrelaza con la facilitación de la supervisión y el impulso a la transformación digital mediante flujos de información en tiempo real. Esta estructura de beneficios evidencia que el valor fundamental de

BIM no reside únicamente en su capacidad modeladora, sino en su función como catalizador de procesos comunicacionales que disminuyen riesgos y fortalecen los canales de decisión. La optimización en la utilización de materiales y la consecuente contribución a la sostenibilidad ambiental emergen como consecuencias naturales de una gestión informacional más precisa, mientras que la generación de confianza y transparencia en la toma de decisiones consolida un círculo virtuoso donde la calidad de la información disponible determina la calidad de las decisiones adoptadas, transformando así la gestión de proyectos en un proceso verdaderamente inteligente y adaptativo (Figura 2).

Figura 2. Beneficios de usar BIM

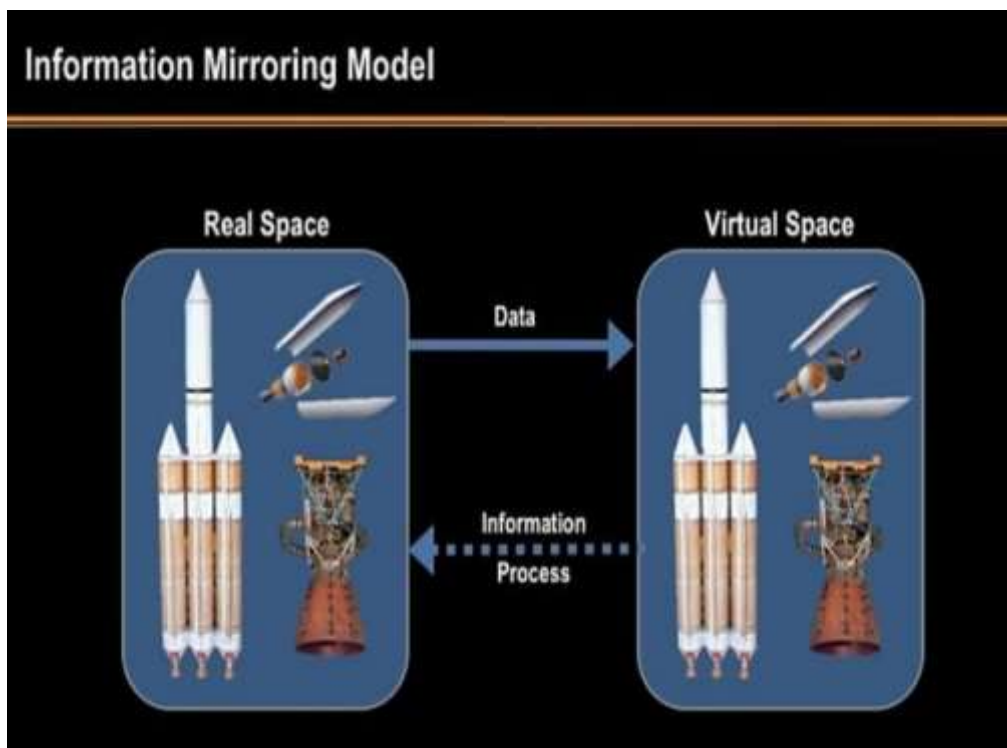


Nota: Alvarado et al., (2024)

La representación esquemática de la arquitectura fundamental de los gemelos digitales expone la triada esencial que sustenta su operatividad: un objeto físico situado en el espacio real, su réplica virtual en el dominio digital y el flujo bidireccional de datos que establece un puente continuo entre ambos universos. Esta configuración trasciende la noción de modelo estático para instaurar un sistema dinámico donde la información circula permanentemente, permitiendo que las modificaciones detectadas en la entidad física se reflejen instantáneamente en su contraparte virtual y, simultáneamente, que las simulaciones ejecutadas en el entorno digital puedan

retroalimentar la gestión del activo real. Así pues, desde la perspectiva de las Ciencias de la Información, este esquema revela la naturaleza esencialmente comunicacional del gemelo digital, cuya verdadera potencia reside no en su fidelidad geométrica, sino en la capacidad de establecer un diálogo ininterrumpido entre la materialidad constructiva y su representación abstracta. Por consiguiente, la conectividad emerge como el elemento vertebrador que transforma un repositorio estático de datos en un organismo informacional vivo, capaz de aprender, anticiparse y adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno construido (Figura 3).

Figura 3. Esquema básico de los gemelos digitales



Nota: Pacheco et al., (2025)

La arquitectura funcional desglosada en la Tabla 3, revela una secuencia operativa donde cada componente del gemelo digital desempeña un papel insustituible en la generación de valor informacional a lo largo del ciclo de vida del activo construido. El modelado virtual constituye la matriz estructural que define los límites y posibilidades del sistema, mientras que la conectividad en tiempo real actúa como sistema circulatorio que mantiene viva la representación digital mediante flujos continuos de datos provenientes del entorno físico. Desde una óptica informacional, resulta particularmente revelador cómo la simulación predictiva transforma el

repositorio histórico de datos en una herramienta prospectiva, permitiendo anticipar escenarios y evaluar intervenciones sin comprometer la integridad del activo real. Esta capacidad de experimentación virtual, respaldada por el monitoreo sistemático y el análisis de patrones, convierte al gemelo digital en un laboratorio dinámico donde la información no solo documenta el pasado, sino que modela activamente el futuro operativo de la infraestructura, cerrando el ciclo mediante decisiones optimizadas que retroalimentan continuamente el modelo y profundizan su comprensión del comportamiento físico.

Tabla 3. Elementos clave del gemelo digital

Elemento	Descripción
Modelado virtual	Réplica exacta de un sistema físico que incorpora características geométricas, materiales y funcionales, creada mediante sensores para reflejar el comportamiento en diversas situaciones.
Conectividad en tiempo real	Sincronización continua entre el objeto físico y su gemelo digital mediante redes y plataformas IoT, permitiendo adaptación a cambios, monitoreo y análisis de datos en tiempo real.
Simulación predictiva	Capacidad de anticipar fallos, desgastes y necesidades de mantenimiento mediante análisis de datos, y ejecutar escenarios hipotéticos sin afectar el entorno físico, optimizando la planificación.
Monitoreo y análisis	Uso de herramientas avanzadas para procesar datos en tiempo real, detectar patrones de comportamiento y predecir fallos o mejoras en el rendimiento.
Optimización y toma de decisiones	Ajuste proactivo de condiciones operativas basado en monitoreo y simulaciones, facilitando decisiones informadas sobre mantenimiento predictivo, gestión de recursos y mejora continua.

Nota: Adaptado de Pedraza (2025)

DISCUSIÓN

La consolidación temática observada en el análisis documental evidencia que la producción científica sobre BIM y gemelos digitales ha trascendido la fase de conceptualización inicial para adentrarse en la validación empírica de aplicaciones concretas. Esta evolución metodológica coincide con lo señalado por Radzi et al., (2023), quienes identificaron cuatro tipos de relaciones entre ambas tecnologías en su revisión sistemática de 54 artículos, destacando que la falta de claridad conceptual ha generado resistencia en la industria para adoptar gemelos digitales incluso en proyectos basados en BIM.

La heterogeneidad de aproximaciones investigativas documentada, que abarca desde revisiones sistemáticas bajo protocolos PRISMA hasta desarrollos ontológicos, refleja la necesaria triangulación metodológica que demanda un objeto de estudio complejo. A diferencia de los hallazgos de Osorio et al., (2023), quienes identificaron clusters de investigación predominantemente centrados en aspectos técnicos aislados, el presente estudio revela una tendencia hacia aproximaciones integradoras que buscan articular los distintos componentes del ecosistema digital, sugiriendo que la madurez del campo permite ahora abordar la complejidad inherente a la sinergia tecnológica desde perspectivas más holísticas y menos fragmentadas.

Los hallazgos relativos a los impactos cuantitativos de la integración BIM-gemelos digitales, particularmente las reducciones del 15 al 20% en desperdicios de materiales y las

mejoras de hasta un 30% en eficiencia energética, encuentran respaldo en investigaciones previas de alcance internacional. Sepasgozar et al., (2020) documentaron resultados similares en su estudio sobre prácticas lean integrando BIM y gemelos digitales para construcción sostenible, confirmando que la sinergia tecnológica produce beneficios tangibles que trascienden el discurso teórico.

No obstante, mientras que estos autores enfatizaron la dimensión ambiental de dichos beneficios, el presente análisis amplía esta perspectiva al evidenciar que las mejoras energéticas y la reducción de desperdicios se articulan sistémicamente con ventajas operativas como la optimización de plazos y la minimización de costos documentadas por Alvarado et al., (2024). Esta convergencia de resultados provenientes de contextos geográficos diversos sugiere que los beneficios de la integración BIM-gemelos digitales poseen un carácter transversal, independiente de las particularidades regulatorias o de mercado de cada país, lo que refuerza la validez externa de las conclusiones alcanzadas.

De manera similar, la distribución de aplicaciones documentadas en la literatura, con un 42% enfocadas en fase constructiva, 38% en operación y 20% en diseño, guarda estrecha correspondencia con la taxonomía propuesta por Rashidi et al., (2024) en su revisión sistemática de la transición de BIM a gemelos digitales. Estos autores identificaron cinco clusters temáticos predominantes, entre los cuales la operación y mantenimiento de activos emergió como el área

de mayor atención investigativa, seguida por la construcción y, en menor medida, el diseño.

Sin embargo, el presente estudio matiza esta jerarquización al evidenciar un equilibrio mayor entre las fases constructiva y operacional, lo que podría interpretarse como un indicador de maduración tecnológica donde el valor añadido se desplaza progresivamente hacia las etapas de mayor permanencia del activo. Esta tendencia resulta consistente con los planteamientos de Omrany et al., (2023), quienes en su revisión de 147 documentos concluyeron que el predominio de aplicaciones en fase operacional constituye una característica definitoria de los gemelos digitales maduros, diferenciándolos de modelos BIM estáticos que concentran su utilidad en etapas tempranas del ciclo de vida.

En contraste con la visión predominantemente tecnocéntrica que caracteriza los primeros desarrollos en construcción 4.0, el análisis realizado identifica consistentemente barreras estructurales que condicionan la adopción generalizada de estas herramientas, destacando los altos costos de implementación, la brecha de habilidades especializadas y los persistentes problemas de interoperabilidad. Estos hallazgos coinciden plenamente con la investigación de Ammar et al., (2022), quienes mediante entrevistas semiestructuradas con nueve profesionales del sector y el análisis de grupos focales identificaron treinta y cuatro desafíos agrupados en seis categorías, siendo los problemas relacionados con la comprensión, preparación y uso de datos los más críticos según la perspectiva de los

practicantes.

Adicionalmente, Shahzad et al., (2022) complementan esta visión al señalar que, junto a las barreras técnicas, existen desafíos culturales y organizacionales igualmente significativos, como la resistencia al cambio y la falta de comprensión del valor estratégico de los gemelos digitales, dimensiones que el presente estudio también identifica como factores limitantes pero que requieren mayor profundización en investigaciones futuras orientadas desde las ciencias sociales.

La emergencia de arquitecturas ontológicas y propuestas de extensión de formatos estandarizados como respuesta a los problemas de interoperabilidad constituye un hallazgo relevante que dialoga críticamente con desarrollos previos. Shi et al., (2023) propusieron una metodología ontológica para integrar BIM, GIS e IoT mediante mapeo de conceptos a nivel semántico, demostrando que es posible establecer patrones generales de integración sin modificar las fuentes de datos originales ni generar pérdidas informacionales.

En una línea complementaria, El-Din et al., (2022) desarrollaron una propuesta metodológica para gemelos digitales de activos constructivos basada en estándares BIM extensibles, específicamente el formato IFC, concluyendo que se requiere incorporar nuevas entidades que representen adecuadamente los dispositivos sensorizados y sus flujos de datos. Estas aproximaciones ontológicas y de extensión de estándares, que el presente estudio identifica como tendencias emergentes, representan un

avance significativo respecto a trabajos anteriores que abordaban la interoperabilidad desde perspectivas meramente técnicas o de conversión de formatos, evidenciando la maduración conceptual del campo hacia soluciones estructurales y semánticamente fundamentadas.

Adicionalmente, la convergencia entre metodología BIM y gemelos digitales está siendo potenciada por la incorporación de capas de inteligencia artificial que amplían sus capacidades predictivas y de automatización. Kor et al., (2023) desarrollaron un modelo conceptual que integra deep learning con gemelos digitales para facilitar la construcción 4.0, validando mediante entrevistas y grupos focales con expertos internacionales que dicha integración incorpora capacidades cognitivas para detectar acciones complejas e impredecibles, razonando sobre estrategias dinámicas de optimización de procesos.

Este hallazgo resulta particularmente relevante porque posiciona a la inteligencia artificial no como un componente periférico sino como capa inteligente central en la arquitectura BIM-gemelos digitales, perspectiva que el presente estudio corrobora al identificar aplicaciones avanzadas en mantenimiento predictivo y detección temprana de anomalías. Asimismo, Bera & Shrivastava, (2025) exploraron la sinergia ampliada al integrar realidad aumentada, realidad virtual e inteligencia artificial con gemelos digitales, concluyendo que este ecosistema tecnológico expandido ofrece oportunidades sin precedentes para mejorar la

visualización, la toma de decisiones y la sostenibilidad en proyectos de infraestructura civil, ampliando así el horizonte de aplicaciones más allá de lo documentado en investigaciones precedentes.

La evolución hacia gemelos digitales predictivos habilitados por grandes volúmenes de datos constituye una tendencia prospectiva que encuentra respaldo en investigaciones de vanguardia. Sompolgrunk et al., (2026) desarrollaron un modelo teórico que explica cómo el sector puede progresar desde prácticas BIM actuales hacia gemelos digitales de sistemas-de-sistemas mediante la evolución hacia BIM etapa 3, habilitada por grandes datos BIM.

Este modelo, fundamentado en estándares contemporáneos y validado mediante revisión sistemática, análisis bibliométrico y entrevistas con expertos, identifica cinco clusters bibliométricos que refuerzan la necesidad de alineamiento estratégico, interoperabilidad horizontal a lo largo de la cadena de suministro y continuidad informacional de extremo a extremo. En sintonía con esta visión prospectiva, Pan & Zhang, (2021) propusieron un marco de gemelo digital integrando BIM, IoT y minería de datos, demostrando mediante un caso práctico que el análisis de procesos y series temporales permite prever cuellos de botella y predecir tareas futuras, facilitando decisiones tácticas que previenen fallos y optimizan la asignación de recursos.

Los hallazgos relativos a la integración de sensores IoT y el enriquecimiento semántico de modelos BIM encuentran un desarrollo técnico

significativo en la investigación de Wang et al., (2022), quienes abordaron el problema de la limitada capacidad del esquema de datos IFC para representar la semántica completa del monitoreo ambiental. Mediante la extensión semiautomática del esquema IFC con la especificación SensorML, estos autores lograron integrar redes de sensores IoT con gemelos digitales, implementando algoritmos de destilación de datos basados en expresiones regulares e interpolación espacial para analizar, computar y visualizar el estado del entorno construido.

Esta solución técnica, validada mediante un estudio experimental, resuelve uno de los problemas de interoperabilidad más persistentes identificados en el presente análisis y abre posibilidades concretas para la gestión inteligente de instalaciones. Complementariamente, Piras et al., (2024) realizaron una revisión sistemática de los habilitadores clave para gemelos digitales en entorno construido, identificando al IoT, la inteligencia artificial, la interoperabilidad y los estándares abiertos como elementos fundamentales, conclusión que coincide plenamente con los requerimientos identificados en el presente estudio para avanzar hacia implementaciones robustas y escalables.

Finalmente, la perspectiva de madurez tecnológica y organizacional para la adopción de BIM y gemelos digitales ha sido abordada sistemáticamente por Alnaser et al., (2024), quienes desarrollaron un marco de evaluación basado en modelos de ecuaciones estructurales

para diagnosticar la preparación en la adopción de estas tecnologías en construcción sostenible. Este marco, validado mediante índices de madurez tecnológica, organizacional y de procesos, proporciona una herramienta diagnóstica y una hoja de ruta práctica que complementa los hallazgos del presente estudio, el cual identifica la necesidad de instrumentos que permitan a las organizaciones evaluar su posición actual y planificar estratégicamente su transición hacia modelos integrados.

En contraste con enfoques puramente tecnológicos, esta aproximación multidimensional reconoce que la adopción exitosa de BIM y gemelos digitales depende tanto de la disponibilidad de infraestructura técnica como de la madurez de procesos, las competencias del talento humano y el alineamiento estratégico, dimensiones que investigaciones precedentes, como la de Fitata, (2022) y Torné, (2022), habían abordado de manera fragmentada y que el presente estudio integra en un marco analítico coherente orientado a facilitar la transformación digital del sector construcción.

CONCLUSIONES

La trayectoria evolutiva que han seguido las investigaciones sobre construcción 4.0 evidencia una maduración conceptual significativa, donde la sinergia entre metodología BIM y gemelos digitales se consolida como eje vertebrador de la transformación digital del sector. Esta convergencia tecnológica ha trascendido el ámbito de la especulación teórica para instalarse

en el terreno de las aplicaciones validadas empíricamente, demostrando que el valor agregado no reside en la adopción aislada de herramientas, sino en la capacidad de articular sistémicamente los flujos informacionales que conectan el mundo físico con su representación virtual. El desplazamiento progresivo del foco de atención desde las etapas de diseño hacia las fases de operación y mantenimiento constituye un indicador inequívoco de que la industria está comprendiendo que el verdadero potencial de estas tecnologías se materializa en la gestión continua del activo a lo largo de su ciclo de vida, superando así la visión limitada que circunscribía la innovación únicamente al proceso constructivo.

En consecuencia, los beneficios documentados en términos de reducción de desperdicios, optimización energética y eficiencia operativa no deben interpretarse como logros aislados, sino como manifestaciones concretas de un cambio paradigmático más profundo que reconfigura la manera de concebir, ejecutar y gestionar los proyectos de infraestructura. La capacidad de anticipar escenarios mediante simulaciones predictivas, de detectar tempranamente desviaciones y anomalías, y de retroalimentar continuamente el modelo virtual con datos del entorno físico, convierte a los gemelos digitales construidos sobre plataformas BIM en instrumentos estratégicos para la toma de decisiones informadas.

Por lo anterior, resulta imperativo reconocer que los desafíos identificados en materia de interoperabilidad, estandarización y desarrollo de

capacidades técnicas no constituyen obstáculos insalvables, sino más bien áreas de oportunidad que requieren inversión sostenida en investigación y desarrollo. La emergencia de arquitecturas ontológicas y extensiones de formatos estandarizados demuestra que es posible avanzar hacia soluciones estructurales que garanticen la comunicación fluida entre plataformas heterogéneas.

REFERENCIAS

- Afzal, M., Khan, A. U., Bilal, M., Ayyub, M. F., & Shoaib, M. (2023). Digital Twins: Facilitating Digital Transformation From and Beyond BIM in Construction. 2023 4th International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI), 593-597. <https://doi.org/10.1109/ICDABI60145.2023.10629297>
- Alnaser, A. A., Ali, A. H., Elmousalami, H. H., Elyamany, A., & Mohamed, A. G. (2024). Assessment Framework for BIM-Digital Twin Readiness in the Construction Industry. Buildings, 14(1). <https://doi.org/10.3390/buildings14010268>
- Alvarado, W. E. P., Flores, M. A. F., & Peña, K. J. A. (2024). Cumplimiento de Plazo y Presupuesto mediante Last Planner System integrando el modelado BIM 4D en la etapa de construcción de proyectos multifamiliares. Caso estudio: Proyecto multifamiliar studio 04, distrito de barranco, provincia de Lima. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/684573>
- Ammar, A., Nassereddine, H., AbdulBaky, N., AbouKansour, A., Tannoury, J., Urban, H., & Schranz, C. (2022). Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. Frontiers in Built Environment, 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.834671>
- Bera, S., & Shrivastava, R. (2025). Exploring the synergy of digital twins: Integration of AI, AR, VR, and BIM. IET Conference Proceedings,

- 2025(7), 976-982.
<https://doi.org/10.1049/icp.2025.1521>
- Boje, C., Hahn, Á. J. M., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroeck, T., & Navarrete Gutiérrez, T. (2023). A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings. *Journal of Building Engineering*, 76, 107232.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107232>
- Cortés, G. A. E. (2022). Metodología Building Information Modeling (BIM) en proyectos de construcción. [Magister en gestión y dirección de proyectos, Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería ...].
<https://repository.ucc.edu.co/items/542a0306-5960-4fe3-b5da-d53867e6dd99>
- Cotino, V. D. (2025). Hidrodata: Metodología BIM para la generación, gestión y mantenimiento de gemelos digitales de infraestructuras hidráulicas [Máster Universitario en Ingeniería Geomática y Geoinformación, Universitat Politècnica De València].
<https://riunet.upv.es/bitstreams/e23848f9-193c-4fb3-87fc-133e5467af68/download>
- Daniotti, B., Masera, G., Bolognesi, C. M., Spagnolo, S. L., Pavan, A., Iannaccone, G., Signorini, M., Ciuffreda, S., Mirarchi, C., Lucky, M., & Cucuzza, M. (2022). The Development of a BIM-Based Interoperable Toolkit for Efficient Renovation in Buildings: From BIM to Digital Twin. *Buildings*, 12(2).
<https://doi.org/10.3390/buildings12020231>
- El-Din, M. N., Pereira, P. F., Martins, J. P., & Ramos, N. M. M. (2022). Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications. *Buildings*, 12(12).
<https://doi.org/10.3390/buildings12122155>
- Fitata, S. D. C. (2022). Industria 4.0 y gemelos digitales en la construcción [Tesis de Grado, Universidad Militar Nueva Granada].
<https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/081efb5b-f398-44bb-81e8-bb617f698b1c/content>
- Franco, J. O. R., Crespo, H. L. C., Stay, D. O. C., & Cusme, C. E. V. (2025). Construcción 4.0 en la transformación de la gestión integral de proyectos con innovación tecnológica. *South Florida Journal of Development*, 6(4), e5152-e5152. <https://doi.org/10.46932/sfjdv6n4-031>
- González, A. F. (2022). Gemelo digital del nuevo puente de Espartxo en San Sebastián [Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria].
<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/27176>
- Hauer, M., Hammes, S., Zech, P., Geisler-Moroder, D., Plörer, D., Miller, J., Karsbergen, V. van, & Pfluger, R. (2024). Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies: A Systematic Literature Review Focusing on Daylight and Artificial Lighting Systems. *Buildings*, 14(3).
<https://doi.org/10.3390/buildings14030805>
- Huangal, N., & Cachay, R. (2025). Integración de la automatización en la construcción 4.0. *Revista Científica Pakamuros*, 13(2), 107-121.
<https://doi.org/10.37787/va8j6b91>
- Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2023). An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(3), 461-487.
<https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2021-0148>
- Minchala, L., M. A. (2023). Gestión de Gemelos Digitales Aplicados en la Arquitectura y la Construcción. [Proyecto Final de Máster Oficial, UPC, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, Departament de Tecnologia de l'Arquitectura].
<https://upcommons.upc.edu/entities/publication/c7d7f43d-5c5f-49aa-8d3e-f879618e8a05>
- Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. *Sustainability*, 15(14).
<https://doi.org/10.3390/su151410908>
- Osorio, C. C. G., Herrera, R., Pellicer, E., Alzate, A. B., & Aristizábal, D. T. (2023). Construcción 4.0: Análisis de clusters y perspectivas de investigación. *Revista ingeniería de construcción*, 38(3), 493-506.
<https://doi.org/10.7764/ric.00083.21>
- Pacheco, C. M. R., Núñez, M. F., Cortés, J. P. P., Oliver-Faubel, I., & Yanza, C. A. P. (2025).

- Retos y beneficios en la implantación de gemelos digitales a partir de metodología BIM. EUBIM 2025. Congreso internacional BIM/14o encuentro de usuarios BIM, 158-169.
<https://riunet.upv.es/bitstreams/e52a3a22-9929-4e66-93ef-47f1e408a77f/download>
- Pan, Y., & Zhang, L. (2021). A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, 124, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>
- Pedraza, B. A. R. (2025). Integración eficiente de gemelos digitales en entornos industriales 4.0 con enfoque optimización tecnológica y seguridad de redes [Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/70621>
- Piras, G., Agostinelli, S., & Muzi, F. (2024). Digital Twin Framework for Built Environment: A Review of Key Enablers. *Energies*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/en17020436>
- Radzi, A. R., Azmi, N. F., Kamaruzzaman, S. N., Rahman, R. A., & Papadonikolaki, E. (2023). Relationship between digital twin and building information modeling: A systematic review and future directions. *Construction Innovation*, 24(3), 811-829. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2022-0183>
- Rashidi, A., Sarvari, H., Chan, D. W. M., Olawumi, T. O., & Edwards, D. J. (2024). A systematic taxonomic review of the application of BIM and digital twins technologies in the construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(3), 1813-1835. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2024-0239>
- Ribon, J. G. M., Montanari, P., Loyola, L. I., & Singhal, S. (2025). Uso de gemelos digitales y sensores IoT para la eficiencia energética de grúas en construcción. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção*, 5. <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/8211>
- Rojas, A. R. C., San Martin, E. C. B., Peña, H. E. S., Jara, J. E., & Flores, J. V. Z. (2022). Aplicación de tecnologías 4.0 a proyectos de edificación [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/76d69dd4-b11d-4879-9269-661e79292f3e>
- Sánchez, A. O. (2025). La metodología Building Information Modeling (BIM) en la gestión de activos viales. Propuesta de aplicación. [Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/12518>
- Sandoval, F. F. M., & Mendieta, C. A. T. (2025). Diseño de edificio de 2 niveles multiusos para la fundación cultural la trinchera en Manta empleando herramientas de la construcción 4.0. [Thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65917>
- Sepasgozar, S. M. E., Hui, F. K. P., Shirowzhan, S., Foroozanfar, M., Yang, L., & Aye, L. (2020). Lean Practices Using Building Information Modeling (BIM) and Digital Twinning for Sustainable Construction. *Sustainability*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/su13010161>
- Shahzad, M., Shafiq, M. T., Douglas, D., & Kassem, M. (2022). Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. *Buildings*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/buildings12020120>
- Shi, J., Pan, Z., Jiang, L., & Zhai, X. (2023). An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102114. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102114>
- Sompolgrunk, A., Golzad, H., Liu, H., Banihashemi, S., & Najafi, M. (2026). The evolution of digital twins within the big BIM data landscape. *Smart and Sustainable Built Environment*, 1-28. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2025-0753>
- Torné, J. P. (2022). Diseño e implementación de un gemelo digital de un proceso de fabricación automatizado [Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://1library.co/document/q7wpxrvk->

Lenin Perez -Martinez. y cols.

diseño-implementación-de-gemelo-digital-proceso-fabricación-automatizado.html

- Torrecilla, J. A. G., Pardo, M. del C. F., & Rubio, J. C. R. (2021). Overall introduction to the framework of BIM-based digital twinning in decision-making in safety management in building construction industry. *Dirección y Organización*, 74, 31-38. <https://doi.org/10.37610/dyo.v0i74.600>
- Wang, T., Gan, V. J. L., Hu, D., & Liu, H. (2022). Digital twin-enabled built environment sensing and monitoring through semantic enrichment of BIM with SensorML. *Automation in Construction*, 144, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104625>
- Zabala, S. V., & Jaimes, M. Q. (2025). Tecnologías 4.0 (IOT y ciencia de datos) orientada a optimizar la gestión de proyectos de construcción. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 1-21. <https://epsir.net/index.php/epsir/article/view/1621>