

**Propuesta de procesos y componentes para la implementación de Gemelos Digitales en
proyectos de edificaciones con usos BIM en Colombia**

María Gabriela Ramírez Di Zeo, Duván Santiago García Gómez

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Modelación y Coordinación
BIM de Edificaciones y Obras Civiles**

Director

Armando Buelvas

MSc en Evaluación y Gerencia de Proyectos

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Facultad de Ingeniería Civil

Especialización en Modelación y Coordinación BIM de Edificaciones y Obras Civiles

2025

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, por su constante apoyo, paciencia, estímulo y fortaleza a lo largo de este proceso y en la culminación de esta etapa académica. A los profesores, por su valiosa orientación, guía, conocimiento, compromiso y dedicación con nuestra formación académica fundamentales para el desarrollo y la consecución de nuestro crecimiento profesional.

Agradecimientos

Con profunda gratitud y una emoción que nos desborda, queremos expresar el más sincero agradecimiento a nuestras familias, que han sido nuestra mayor inspiración por su amor incondicional, su paciencia infinita y cada sacrificio hecho en silencio, han sido el motor para impulsarnos a seguir adelante, incluso en los momentos de mayor desafío y gracias por creer en nosotros. Este logro también es suyo.

A los profesores, cuyo compromiso y pasión por la enseñanza encendieron la curiosidad nutriendo nuestro intelecto y dejando una huella significativa en esta formación personal y profesional. Su sabiduría, sus valiosas orientaciones y el tiempo dedicado a compartir su conocimiento, no solo enriquecieron este proyecto, sino que marcaron una huella imborrable en nuestra formación. Gracias por su guía experta y su inspiración para alcanzar nuevas metas.

Contenido

Introducción	12
1. Propuesta de procesos y componentes para la implementación de gemelos digitales en proyectos de edificaciones con usos BIM en Colombia	16
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. Marco teórico.....	16
4.1 3.1. Las dimensiones asociadas del BIM	16
4.2 3.2. Marco conceptual	20
3.2.1. Gemelo digital “digital twin”	20
3.2.2. Building information modeling (BIM)	21
3.2.3. Internet de las cosas (IoT)	21
3.2.4. Industria 4.0 y construcción 4.0	21
3.2.5. Ciclo de vida de la construcción.....	22
3.3. Marco legal.....	22
3.3.1. Normas y marcos aplicados en Colombia	23
3.3.2. Consideraciones legales y éticas.....	24
4. Método	25
4.3 Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación	27

4.4	Describir los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia.....	27
4.5	Identificar las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia.....	28
5.	Resultados.....	28
5.1	Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación.....	29
5.1.1.	Uso sectorial de gemelos digitales en Colombia.....	29
5.1.2.	Principales beneficios reportados.....	30
5.1.3.	Panorama global de crecimiento.....	31
5.1.4.	Nivel de familiaridad en AEC (arquitectura, ingeniería y construcción).....	32
5.2	Describir los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia.....	33
5.3	Identificar las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia.....	37
6.	Conclusiones.....	40
	Referencias.....	41

Lista de tablas

Tabla 1. *Enfoque metodológico* 26

Tabla 2. *Documentos revisados* 29

Lista de figuras

Figura 1. <i>Simulación rutas para transmilenio con gd</i>	14
Figura 2. <i>Construcción rutas para Transmilenio con gd</i>	14
Figura 3. <i>Beneficios de los gemelos digitales</i>	19
Figura 4. <i>Estructura metodología de trabajo</i>	26
Figura 5. <i>Uso de gemelos digitales</i>	30
Figura 6. <i>Panorama global gemelos digitales</i>	31
Figura 7. <i>Encuesta implementación gemelos digitales</i>	32
Figura 8. <i>Familiaridad gemelos digitales</i>	32
Figura 9. <i>Estructura metodología de trabajo</i>	33

Resumen

La metodología BIM, establece un entorno común de datos (CDE) para planificar, diseñar, construir y operar activos a lo largo de su ciclo de vida (Spain, 2021). La incorporación de gemelos digitales preciso y confiable que permite la toma de decisiones más eficiente durante las fases de operación y mantenimiento con la creación de réplicas virtuales avanzadas que integran datos en tiempo real de sensores y sistemas operacionales permitiendo monitoreo dinámico, simulación y mantenimiento predictivo basado en datos (Constructivo, 2024). Guías nacionales como Chile, España, Colombia, etc., fomentan su convergencia para crear Smart Cities e infraestructura sostenible. Ejemplos como Virtual Singapore ilustran cómo BIM + GIS + Gemelos Digitales mejoran la gestión urbana colaborativa, eficiente y resiliente (Ministerio, 2023). El BID y el DNP de Colombia promueven esta estrategia para impulsar la convergencia tecnológica que fortalece la infraestructura inteligente y ciudades sostenibles. Los resultados indican que al identificar y caracterizar los procesos críticos y componentes tales como tecnología, metodología y organización en las diferentes etapas del ciclo de vida necesarios para la implementación efectiva de gemelos digitales que integren metodologías BIM en el contexto colombiano, se evidenciaron los elementos de transición hacia modelos de gestión dinámicos basados en datos, a partir del análisis de procesos actuales, revisión del estado del arte e identificación de elementos de integración BIM con gemelos digitales.

Palabras claves: BIM, gemelos digitales, construcción

Abstract

The BIM methodology establishes a common data environment (CDE) to plan, design, build and operate assets throughout their life cycle (Spain, 2021). The incorporation of precise and reliable digital twins that allows more efficient decision making during the operation and maintenance phases with the creation of advanced virtual replicas that integrate real-time data from sensors and operational systems allowing dynamic monitoring, simulation and data-based predictive maintenance (Constructivo, 2024). National guides such as Chile, Spain, Colombia, etc., promote their convergence to create Smart Cities and sustainable infrastructure. Examples such as Virtual Singapore illustrate how BIM + GIS + Digital Twins improve collaborative, efficient and resilient urban management (Ministerio, 2023). The IDB and the DNP of Colombia promote this strategy to promote technological convergence that strengthens smart infrastructure and sustainable cities. The results indicate that by identifying and characterizing the critical processes and components such as technology, methodology, and organization at the different stages of the life cycle necessary for the effective implementation of digital twins that integrate BIM methodologies in the Colombian context, elements of the transition toward dynamic, data-driven management models were evidenced. This was based on the analysis of current processes, a review of the state of the art, and the identification of integration elements between BIM and digital twins.

Keywords: BIM, digital twin, construction

Glosario

2D: Segunda dimensión incorpora información de textos.

3D: Tercera dimensión incorpora información de geométrica.

4D: Cuarta dimensión incorpora información de tiempos.

5D: Quinta dimensión incorpora información de costos.

6D: Sesta dimensión incorpora información de seguridad y ambiental.

7D: Séptima dimensión incorpora información de mantenimiento y operación.

ACC: Autodesk construction cloud.

ACD: Ambiente común de catos.

AEC: Arquitectura, ingeniería y construcción.

ARQ: Arquitectura.

AVT: Ambiente virtual de trabajo.

BID: Banco interamericano de desarrollo.

BIM: Building información modeling.

BMS: Building management system.

CAMACOL: Cámara Colombiana de la construcción.

CAPEX: Capital expenditure.

CDE: Common data enviroment.

DNP: Departamento nacional de planeación.

DT: Digital twins.

EST: Estructura.

GD: Gemelo digital.

IA: Inteligencia artificial.

IC: Information core.

ICONTEC: Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación.

IDU: Instituto de desarrollo urbano.

IFC: Industry foundation classes.

IoT: Internet of things.

ISO: Organización internacional de normalización.

LOD: Level of development.

LODe: Level of detail.

LoiN: Level of information need.

MEP: Mecánico, eléctrico y plomería.

MIC: Modelado de información de la construcción.

MQTT: Message queueing telemetry transport.

MVD: Model view definition.

NDD: Nivel de desarrollo.

NDDe: Nivel de detalle.

NI: Núcleo de información.

NTC: Norma técnica colombiana.

OPEX: Operational expenditure.

PEI: Plan de entrega de información.

PIM: Project information molde.

PMEI: Plan maestro de entrega de información.

RGPD: Reglamento general de protección de datos.

SIG: Sistema de información geográfica.

Introducción

En la última década, el sector de la construcción ha comenzado a transitar hacia una transformación digital impulsada por tecnologías emergentes que buscan mejorar la eficiencia, sostenibilidad y control sobre el ciclo de vida de los proyectos. El Building Information Modeling (BIM siglas en inglés) o Modelado de Información de la Construcción (MIC siglas en español), es una metodología de gestión de proyectos que usa la tecnología para la creación, ejecución y operación de modelos digitales inteligentes que integran información geométrica, técnica y administrativa del proyecto. El BIM ha planteado el uso de la tecnología para la automatización de los procesos generando su relación con la inteligencia artificial o simulaciones reales. El concepto de GD (DT) se crea como un elemento asociado a BIM cercano al uso de simulaciones, definido como la réplica virtual de un activo físico, actualizada en tiempo real mediante sensores y datos operativos, que permite su modelado, monitoreo y optimización (Revolti et al., 2024).

El creciente interés en la relación entre BIM y los GD radica en su capacidad conjunta para ofrecer una representación fiel, dinámica y continua del activo construido. Mientras que el modelo BIM proporciona la base estructurada de información y diseño (LoIn, LOD, NDD, LODE, NDDe), el GD es un modelo que se apoya en esta para reflejar el comportamiento real del activo durante su ciclo de vida. Esta sinergia es fundamental en la búsqueda de procesos constructivos más inteligentes y sostenibles (Dodge y Analytics, 2012). La búsqueda de mejora en los procesos de gestión de la construcción se puede apoyar en metodologías de información como de modelado similares a los GD. Es posible identificar las variables o herramientas disponibles y aprovechables para la obtención de beneficios a mediano y largo plazo.

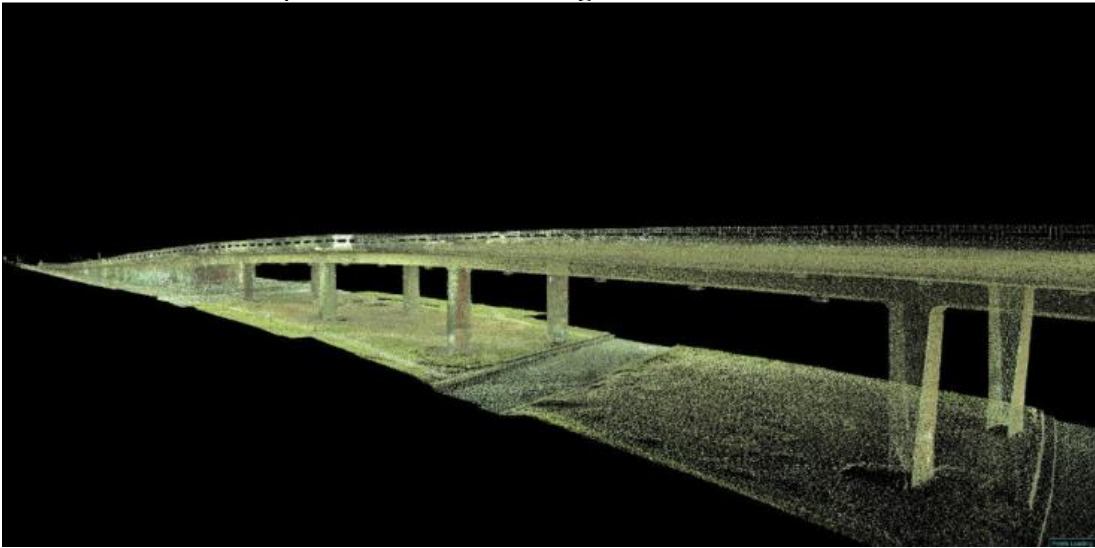
El concepto de GD se remonta a la década de 1960, en la cual fue utilizado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA siglas en inglés) en la réplica de sus

naves espaciales creando modelos virtuales que recreaban el funcionamiento de estas mediante modelos digitales o MVD. Sin embargo, no fue hasta 2002 que el término GD fue aplicado al ciclo de vida de productos, presentado por el Dr. Michael Grieves, una idea con un gran potencial, pero con un desafío tecnológico para ese momento, pues consistía en una central de información llamada Núcleo de Información “Information Core” diseñado para la integración de datos de un producto en sus diferentes etapas 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, desde la planificación, diseño, construcción, operación y demolición (Chicaiza et al., 2024).

A pesar de que la tecnología de los GD tiene un gran potencial y ha evolucionado de manera acelerada, no ha sido aprovechada para llegar a transformar el sector de la construcción, así como lo han hecho la industria manufacturera y automotriz. (Zani, 2024). las bases para el desarrollo y aplicación de GD en la industria de la energía eléctrica. Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR) – CONICET – UTN, Argentina. Se ha demostrado las aplicaciones de los modelos digitales en diseño de arquitectura e ingeniería, con una implementación más tímida, cuando uno de los mayores beneficios que ofrece esta tecnología se encuentra en la parte operativa del activo, el entorno y la relación que este ofrece.

En Colombia, la adopción de GD en los sectores de infraestructura y construcción apenas supera el 10 %, lo cual evidencia un amplio margen para su integración con BIM y SIG (Torres, 2024). Estas tecnologías permiten mejorar la transparencia del flujo de información, impulsar la toma de decisiones basada en datos y reducir errores y costos operativos OPEX (Constructivo, 2024). El uso de gemelos digitales puede generar hasta un ahorro de 35 % en costos de construcción CAPEX, y reducir emisiones de carbono hasta en un 50 %–100 %, según Bentley Systems (Inmobiliare, 2022). Un caso notable es Transmilenio, que utiliza Gd para modelar rutas, monitorear flotas y ofrecer información dinámica a los usuarios (Opinión, 2024).

Figura 1. *Simulación rutas para transmilenio con gd*



Tomado de (SIGLA, 2025).

Figura 2. *Construcción rutas para Transmilenio con gd*



Tomado de (IDU, sf).

El propósito de esta monografía es, por tanto, analizar la relación entre BIM y los GD, enfocándose en su aplicación en el contexto colombiano, tomándose como base los estándares BIM vigentes, incluyendo la normativa ISO 19650 y su adopción nacional a través de las NTC,

así como los marcos estratégicos desarrollados en Colombia y otros países de referencia. Este análisis permitirá establecer recomendaciones para la integración efectiva de estas tecnologías, con el fin de mejorar la eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad en los proyectos de construcción del país.

1. Propuesta de procesos y componentes para la implementación de gemelos digitales en proyectos de edificaciones con usos BIM en Colombia

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Proponer los procesos y componentes que, según la literatura, permiten la implementación de gemelos digitales en proyectos de edificaciones con procesos y usos BIM en Colombia.

2.2. Objetivos específicos

Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación.

Describir los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia.

Identificar las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia.

3. Marco teórico

3.1. Las dimensiones asociadas del BIM

El BIM es una metodología colaborativa de trabajo para crear y gestionar proyectos de construcción con el principal propósito de recopilar y centralizar información en un ACC, para

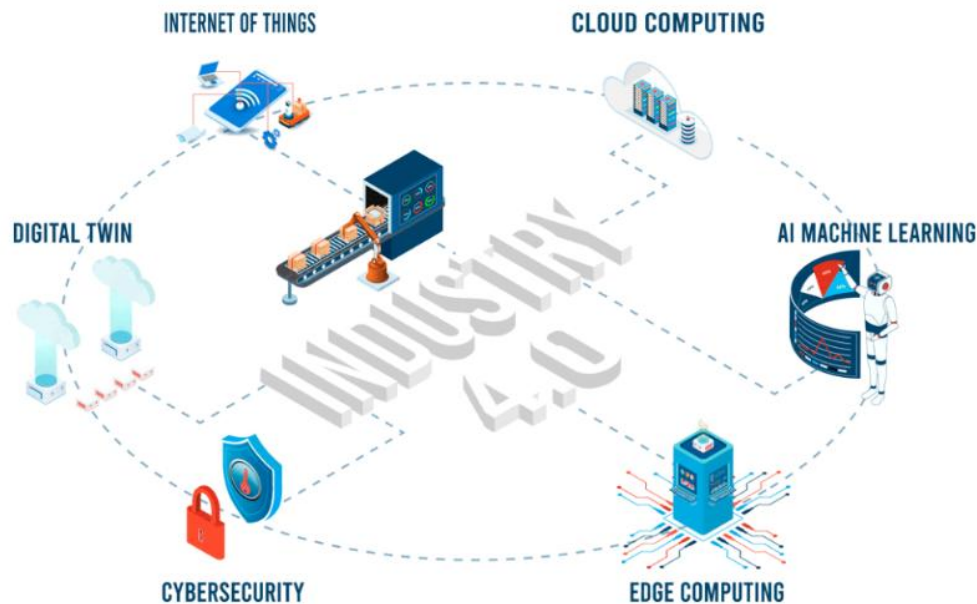
optimizar los procesos del ciclo de vida de un proyecto de construcción, que incluyen información geométrica (3D), de tiempos (4D), de costes (5D), ambiental (6D) y de mantenimiento (7D), para Eastman et al. (2011), BIM es una metodología basada en modelos digitales que permite a los profesionales del diseño y la construcción colaborar utilizando una base de datos común que representa virtualmente el edificio o infraestructura. Muñoz García (2021) define BIM como un sistema que potencia la interoperabilidad y mejora la calidad del diseño y la comunicación interdisciplinar mediante el enfoque OpenBIM, especialmente en proyectos de edificación en Colombia. En términos de dimensiones su mayor alcance es la industrialización de la construcción (10D) con su máxima expresión en la creación del gemelo digital, un modelo dinámico actualizado en tiempo real con sistema de monitoreo.

La relación de BIM con los GD es de carácter complementario con un flujo de información bidireccional, en otras palabras, los GD son los que permiten la expansión de la información generada por BIM, que incorporan los datos en tiempo real de un activo construido, la metodología BIM es esa base estructurada a través de modelos de información integral de la cual se parte para la creación de esta replica virtual, con flujos de trabajo que se realizan en un ambiente común de datos colaborativo (ACC) o common data environment. (CDE), bajo estándares BIM con información soportada en datos de código abierto.

A través de tecnologías como el internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial y sistemas de monitoreo, el gemelo digital se alimenta continuamente de datos reales (temperatura, humedad, consumo energético, vibraciones, etc.) que reflejan el estado actual del activo físico, que vuelve dinámico un modelo que originalmente era estático, permitiendo simular escenarios y predecir comportamientos, con el fin de optimizar procesos. Varios de los estudios sobre uso de GD en construcción se han enfocado en la tecnología BIM, Si bien esta metodología y los GD tienen

semejanza, existen diferencias que radican en su propósito, tecnología, finalidad y la etapa de vida de la aplicación. Los Gemelos basados en BIM tienen una gran alianza cuya importancia radica en la “IF” (información manager) integrada, se puede crear un gemelo digital sin BIM, pero alcanza su mayor potencial por medio de esta metodología colaborativa, aprovechando la eficiencia de la tecnología en un proyecto de construcción (Martínez-Manso y Delgado-Fernandez, 2023).

Los GD son una tecnología que por sí sola tiene la capacidad de integrar toda la información de un proyecto para generar una réplica virtual, pero que en la construcción se potencia y se vuelve más eficiente por medio de los datos provenientes del BIM y se pueden aplicar en la diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto, aunque hasta el momento en la mayoría de los casos se ha usado en etapas de diseño e ingeniería, los beneficios también aplican en las demás etapas de un proyecto como las de construcción y monitoreo y se ven reflejados en los procesos de desarrollo del activo, anticipando el comportamiento de este, aumentando la eficiencia en la ejecución y el funcionamiento.

Figura 3. *Beneficios de los gemelos digitales*

Tomado de (Skanak Industria 4.0, sf)

El uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación.

Los componentes de un GD a implementar en las diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción con tipologías de edificaciones son el diseño y planificación, construcción, operación y mantenimiento.

Etapas de diseño y planificación: con la información proveniente de la conexión con BIM se desarrollan modelos 3D detallados que van a ser el soporte principal del GD. Mediante este elemento, los GD ofrecen la opción de simular la variedad de posibles escenarios que permiten visualizar y determinar la capacidad en términos de eficiencia, costos y sostenibilidad, además de aportar un resultado visual minucioso del proyecto, que permite una interoperabilidad y colaboración entre las partes involucradas y el PIM.

Etapas de construcción: los GD permiten realizar el seguimiento dentro del avance constructivo de la edificación, que ayudan a reconocer contratiempos con el fin de optimizar el uso de recursos y realizar control de calidad, asegurando que el proceso constructivo se desarrolle de acuerdo con estándares que apliquen e identificando riesgos tangibles en la etapa de ejecución mediante simulación de escenarios seguros que determinan las acciones preventivas a realizar de acuerdo con el PEI y el PMEI.

Etapas de operación y mantenimiento: el monitoreo remoto contribuye en la supervisión en tiempo real del activo evidenciándolos posibles problemas que se generan durante la etapa de operación. Los GD permiten la realización de mantenimiento predictivo, mediante el resultado que arroja el análisis de datos del GD se proyectan las tareas de mantenimiento del proyecto y optimización del rendimiento, mejorando la capacidad de eficiencia de los sistemas.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Gemelo digital “digital twin”

El GD es una representación virtual de un objeto, proceso o sistema físico, que permite simular, monitorear y optimizar su comportamiento a lo largo del tiempo. Según (Grieves, 2022), quien acuñó el término, el gemelo digital incluye tres componentes: el objeto físico en el mundo real, su réplica digital y la conexión entre ambos mediante datos en tiempo real.

En el contexto de la industria de la construcción, los GD permiten visualizar el ciclo de vida completo de un proyecto, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento del edificio o infraestructura. Esto implica el uso de sensores IoT, modelos BIM, inteligencia artificial y análisis de datos para tomar decisiones más informadas y reducir costos.

3.2.2. Building information modeling (BIM)

El BIM es una metodología que implica la creación y gestión de modelos digitales con información paramétrica del proyecto de construcción. Es un elemento esencial para el desarrollo de GD, ya que proporciona la base geométrica y de datos que permite la simulación del comportamiento del edificio.

El BIM va más allá de un simple modelo 3D: incluye información temporal (4D), de costos (5D), de sostenibilidad (6D) y de mantenimiento (7D). Esta riqueza de datos es lo que hace posible que un gemelo digital funcione de manera dinámica y conectada a la realidad.

3.2.3. Internet de las cosas (IoT)

El internet de las cosas se refiere a la interconexión de objetos físicos mediante sensores, software y otras tecnologías que les permiten recopilar y compartir datos en tiempo real. En la construcción, el IoT se utiliza para monitorear variables como temperatura, humedad, vibración, energía, y más, lo cual enriquece el gemelo digital con información actualizada constantemente.

La integración del IoT con el modelo digital permite que el gemelo no sea estático, sino un sistema vivo que refleja con precisión el estado actual del objeto físico.

3.2.4. Industria 4.0 y construcción 4.0

La industria 4.0 hace referencia a la cuarta revolución industrial, caracterizada por la digitalización, automatización e interconectividad de los procesos. En el sector de la construcción, se traduce en la llamada Construcción 4.0, que promueve el uso de tecnologías avanzadas como BIM, drones, impresión 3D, realidad aumentada y gemelos digitales.

La Construcción 4.0 busca transformar el sector tradicionalmente lento e ineficiente en uno más ágil, sostenible y tecnológico. En este nuevo paradigma, el gemelo digital se posiciona como una herramienta clave para lograr esa transformación.

3.2.5. Ciclo de vida de la construcción

El ciclo de vida de un proyecto de construcción incluye las fases de planificación, diseño, construcción, operación, mantenimiento y, eventualmente, demolición o renovación. Un gemelo digital acompaña todo este ciclo, aportando beneficios como:

Simulación de escenarios antes de ejecutar.

Monitoreo en tiempo real durante la operación.

Toma de decisiones basada en datos durante el mantenimiento.

Reducción de riesgos y costos operativos.

3.3. Marco legal

Aunque hasta el momento no encontramos una normativa establecida específicamente para los GD usados en proyectos de construcción de edificaciones, debido a que es una tecnología emergente que se está implementando, sí existe una relación indirecta con algunos estándares que se aplican como BIM, IoT y smart cities, que generan un marco regulatorio al cual acogerse. La normativa sobre gemelos digitales aún se encuentra en desarrollo, pero existen varios estándares y marcos relevantes, especialmente en el ámbito de la fabricación. Además, se están considerando aspectos legales y éticos relacionados con la propiedad intelectual y el uso de datos generados por IA en gemelos digitales. En Colombia la base normativa que permite la integración de una réplica virtual se basa directamente en los estándares de la implementación BIM.

3.3.1. Normas y marcos aplicados en Colombia

Estrategia nacional BIM 2020–2026 (departamento nacional de planeación, DNP): establece una hoja de ruta para que, a partir de 2026, el uso de BIM sea obligatorio en todos los proyectos de infraestructura pública.

NTC-ISO 19650 (partes 1, 2 y 5) – ICONTEC: son una serie de normas, adoptadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), proporciona lineamientos para la gestión de la información durante el ciclo de vida de un activo construido utilizando BIM.

ISO 16739 (IFC – industry foundation classes): a pesar de que no ha sido adoptada legalmente como NTC, es mayormente utilizada para asegurar la interoperabilidad, esencial para que los datos del gemelo digital puedan integrarse con múltiples sistemas.

ISO 23247: esta norma define un marco de referencia para gemelos digitales en la fabricación, abarcando desde conceptos básicos hasta aplicaciones especializadas.

IPC-2551: esta norma se centra en la interoperabilidad y el intercambio de datos estandarizado en el contexto de gemelos digitales, con el objetivo de crear cadenas de valor inteligentes.

Ley 1581 de 2012 – protección de datos personales: regula el manejo de datos personales en Colombia. El sistema de gemelo digital que recopile datos de ocupantes o usuarios de una edificación debe garantizar medidas de seguridad adecuadas.

ISO/IEC 27001 – seguridad de la información: si bien no es una norma legal obligatoria, representa un estándar internacional para la protección de sistemas de información que pueden aplicarse a los gemelos digitales en lo relacionado a infraestructura de datos.

La guía BIM para Colombia del BID y el DNP (2019): aporta orientación para estandarizar modelos y procesos de implementación.

El consejo colombiano de construcción sostenible (2017): publicó una guía para implementación de BIM en Colombia, enfocada en sostenibilidad y buenas prácticas.

La Universidad de los Andes (2021): realizó un estudio detallado sobre la adopción de BIM en el país, que evidencia brechas y tendencias del sector académico y empresarial.

La encuesta nacional BIM 2023 de Camacol: reveló que la adopción del BIM ha aumentado rápidamente en empresas colombianas.

3.3.2. Consideraciones legales y éticas

La introducción de esta tecnología en un proyecto de construcción también tiene relación con unos elementos legales y éticos. Al tiempo que los gemelos digitales se popularizan y se desarrolla el marco regulatorio alrededor, las empresas deben considerar los riesgos que implican establecer y mantener un gemelo digital (Tang, 2023) como, por ejemplo:

Ciberseguridad: con datos sensibles se deben mantener a salvo mediante redes seguras y encriptación para garantizar el cumplimiento de las leyes y regulaciones aplicables.

Riesgo de modelado: protocolos para verificar la precisión de la recopilación de datos para el gemelo digital, evitando imprecisiones de un modelo incorrecto, con consecuencias legales potencialmente graves y costosas.

Propiedad intelectual: considerar y establecer claramente quién será el propietario de qué partes de un gemelo digital, ya sea mediante derechos de propiedad intelectual o de otro tipo. Adicionalmente, deben considerar si el gemelo digital contendrá información protegida por derechos de autor.

Asignación de riesgos: garantizar la precisión del flujo de datos o de demostrar su exactitud y abordar las posibles problemáticas.

Obligaciones externas: según evoluciona el marco regulatorio alrededor a los gemelos digitales, las empresas pueden estar sujetas a expectativas respecto a la configuración y el uso de su gemelo. Como en el caso del Reino Unido, donde establecen principios como la claridad de propósito, calidad y eficacia funcional al configurar gemelos digitales.

Derechos de autor: la atribución de derechos de autor a contenido generado por IA en gemelos digitales es un área aún en desarrollo.

Propiedad intelectual: es crucial definir la propiedad intelectual de los datos y modelos utilizados en los gemelos digitales, especialmente cuando se trata de datos generados por IA o datos de terceros.

Privacidad de datos: la gestión y protección de datos personales en los gemelos digitales, especialmente en aplicaciones de salud, requiere una atención especial para garantizar la privacidad y el cumplimiento del reglamento general de protección de datos (RGPD).

Interoperabilidad: la capacidad de los gemelos digitales para comunicarse e intercambiar datos con otros sistemas es fundamental para su eficacia.

Seguridad: la implementación de protocolos de seguridad robustos es esencial para proteger los datos y la información transmitida entre gemelos digitales y otros sistemas.

Ética: el uso de gemelos digitales, especialmente en áreas como la salud y la toma de decisiones automatizada, plantea cuestiones éticas sobre la transparencia, la responsabilidad y el impacto en la sociedad.

4. Método

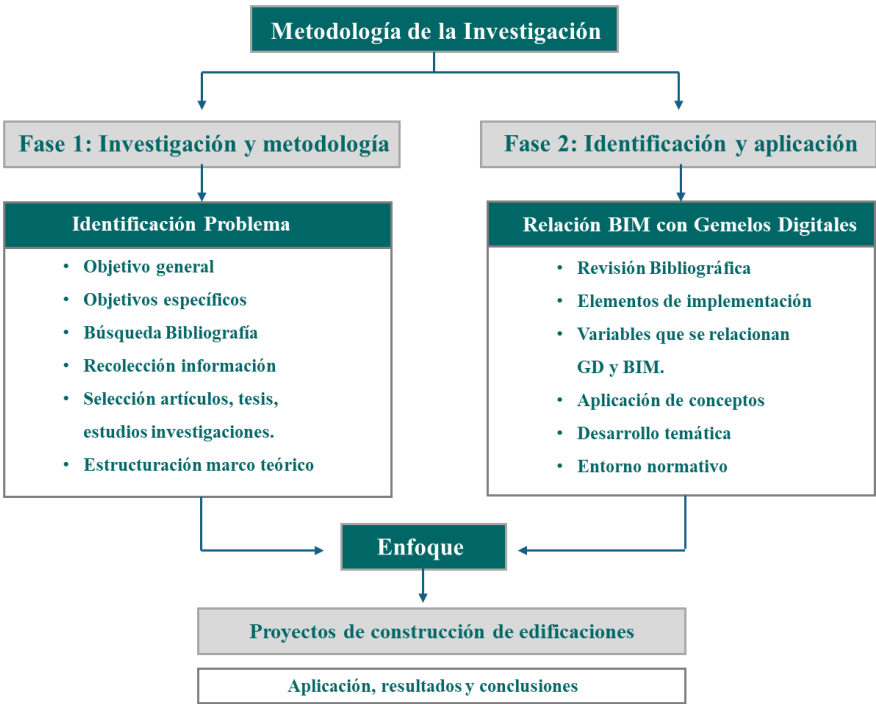
Este documento de investigación se desarrollará bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo y exploratorio, ya que busca analizar y comprender la relación entre la metodología

BIM y los GD en el contexto colombiano. El objetivo es identificar los marcos normativos, beneficios, limitaciones y proyecciones de esta tecnología en proyectos de construcción del país.

Tabla 1. Enfoque metodológico

Enfoque	Descripción
Documental	Revisión de literatura científica, académica, informes técnicos, normas ISO y casos de estudio sobre BIM y gemelos digitales en Colombia.
Comparativo	Contraste entre la adopción de BIM y Digital Twins en Colombia vs. países líderes (Chile, México, Reino Unido, Singapur, España, etc.).
Estadístico-Descriptivo	Análisis de datos secundarios sobre uso, costos, beneficios e implementación de gemelos digitales en Colombia.

Figura 4. Estructura metodología de trabajo



4.1 Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación

Mediante una minuciosa investigación bibliográfica acerca del concepto de GD o DT, se definió como esta tecnología abarca un amplio tema en varios sectores como la industria de automotores y la manufacturera, razón por la cual la búsqueda se enfoca en arquitectura e ingeniería, directamente relacionado con el sector de la construcción aplicado a tipología de edificaciones. Se utilizaron las siguientes ecuaciones de búsqueda para documentos entre 2020 hasta 2025:

DIGITAL TWIN AND BIM = 950 - WEB OF SCIENCE (Clarivate, 2025)

DIGITAL TWIN AND BIM = 9461 - SCOPUS PREVIEW (Elsevier, 2025)

DIGITAL TWIN AND BIM AND CONSTRUCTION AND BUILDING = 5818 - SCOPUS (Elsevier, 2025)

4.2 Describir los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia

Luego de una exploración dentro de la literatura referente a la tecnología de los gemelos digitales se busca establecer una serie de componentes claramente identificables, que marcan una ruta clara dentro del proceso de implementación y su aplicación en las diferentes disciplinas de un proyecto de construcción, que tiene como finalidad potenciar el desarrollo de los diferentes modelos que van a ayudar en la integración de datos para la creación de la réplica virtual de un activo físico que está en una continua actualización y permite visualizar el comportamiento físico del activo. Dejando ver las ventajas que la determinación de estos elementos permite como:

optimizar procesos, reducir costos y mejorar la eficiencia en todas las fases del proyecto, desde el diseño conceptual hasta la gestión del ciclo de vida del edificio.

4.3 Identificar las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia

A partir de toda la información recopilada se establece cuáles son los elementos que relacionan los gemelos digitales en proyectos en la etapa de construcción y la finalidad principal es poder identificar cuáles son los componentes de estas tecnologías y así estructurar de la manera eficiente sus beneficios. Ya teniendo claros los elementos, buscamos identificar cuáles son las variables que podemos encontrar en la relación de Gemelos Digitales con BIM, estableciendo como es su funcionamiento en cada una de las etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción de edificaciones, evidenciando cuáles son sus ventajas y sus deficiencias, teniendo claridad de la adopción de BIM como principio de información para la implementación de esta tecnología.

5. Resultados

Colombia ha avanzado en la estructuración de marcos normativos, guías y programas de formación técnica para la adopción de BIM (Camacol, 2023). Sin embargo, estudios recientes muestran que la madurez digital aún es limitada y que la mayoría de las organizaciones se encuentran en etapas iniciales de implementación (DNP, 2022-2026). El Decreto 1937 de 2021, que establece la obligatoriedad del uso de metodologías BIM en contrataciones públicas, marca un hito importante. No obstante, aún no existe una política nacional explícita sobre gemelos digitales ni una estrategia que fomente su desarrollo con base en los modelos BIM existentes.

5.1 Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación

Se seleccionaron algunos documentos base de varios documentos como los siguientes:

Tabla 2. *Documentos revisados*

<i>No</i>	<i>Nombre</i>	<i>Autor</i>	<i>Año</i>
1	Gemelos digitales y su evolución en la industria	Michelle Varas Chiquito, Juan Carlos García Plua, Mariana Bustamante Chong, César Bustamante Chong	2020
2	Arquitectura básica de diseño de gemelos digitales para la construcción	Héctor Martínez-Manso, Tatiana Delgado-Fernández	2022
3	Aplicación de gemelos digitales en la industria de la construcción: una revisión de la literatura	De-Graft Joe Opoku a, Srinath Perera a, Robert Osei-Kyei a, Maria Rashidi b	2021
4	Gemelo digital: el modelo inteligente de datos, futuro de la edificación ¿Cómo transformará el gemelo digital el sector de la arquitectura, la ingeniería y la construcción?	Sarah Jones	2021
5	¿Qué es un gemelo digital? Cómo los modelos de datos inteligentes pueden moldear el mundo construido.	Drew Turney	2024
6	Hacia un gemelo digital de construcción semántica: direcciones para futuras investigaciones	Calin Boje a, Annie Guerriero a, Sylvain Kubicki y, Yacine Rezgui b	2020
7	Gemelo digital: visión, beneficios, límites y creación para edificios	Siavash H. Khajavi, Naser Hossein Motlagh, Alireza Jaribion, Liss C. Werner, Jan Holmström	2019
8	Gemelo digital: del origen al futuro	Maulshree Singh, Evert Fuenmayor, Eoin P. Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray, Declan Devine	2021
9	El papel del BIM en la integración del gemelo digital en la construcción de edificios: una revisión de la literatura	Tran Duong Nguyen, Sanjeev Adhikari	2023

De la información recopilada se puede identificar el uso sectorial de los gemelos digitales, principales beneficios, panorama global y nivel de familiaridad.

5.1.1. *Uso sectorial de gemelos digitales en Colombia*

Según Esri y Autodesk (2023), el sector de la construcción e infraestructura ha comenzado a incorporar gemelos digitales, aunque va rezagado frente a otros sectores como servicios públicos y manufactura.

Infraestructura y construcción: Adopción incipiente (< 10 %).

Servicios públicos / energía: Adopción avanzada (> 60 %).

Manufactura, finanzas, retail: Adopción Intermedia entre (30–50 %).

Figura 5. *Uso de gemelos digitales*



Tomada de (Radar Tecnológico, sf).

5.1.2. Principales beneficios reportados

Según el mismo estudio de Esri / Geospatial World se pueden relacionar las siguientes ventajas:

el 40–60 % del tiempo profesional se gasta en buscar y validar información entre etapas de proyecto.

Una comunicación efectiva entre sistemas puede reducir el tiempo de entrega en hasta un 20 %.

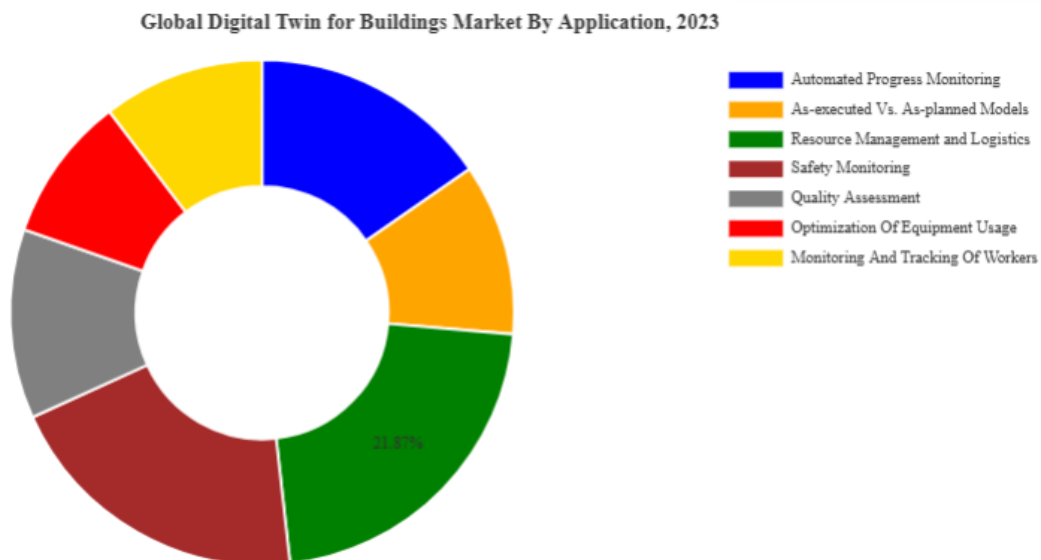
La mala gestión de datos aumenta costos hasta en 30 %.

Con buena administración de datos, se puede lograr un ahorro de costos del 14 % en promedio.

5.1.3. Panorama global de crecimiento

El mercado global de gemelos digitales para edificios estaba valorado en 1,49 millones de € en 2023, con proyección de crecer hasta 18,87 millones de € en 2032, creciendo a una tasa compuesta anual del 32,6 % de 2024 a 2032.

Figura 6. *Panorama global gemelos digitales*

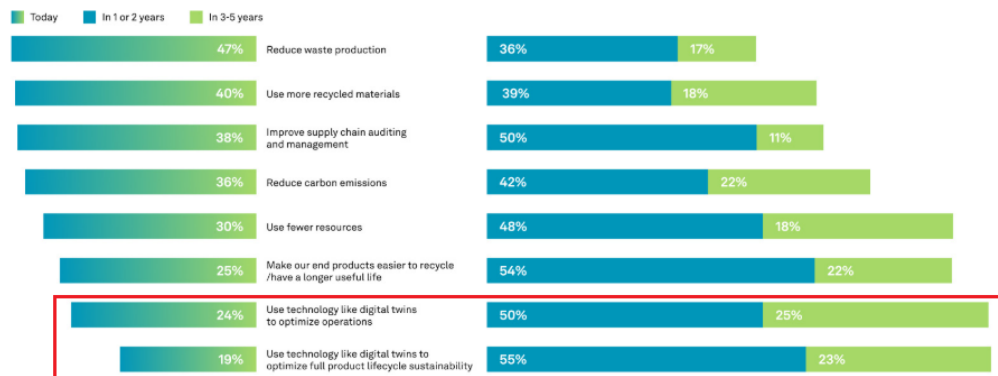


Tomada de (Astute Analytica, sf).

El sector de construcción se proyecta con un CAGR del 23 a 25% en cinco años.

Figura 7. Encuesta implementación gemelos digitales

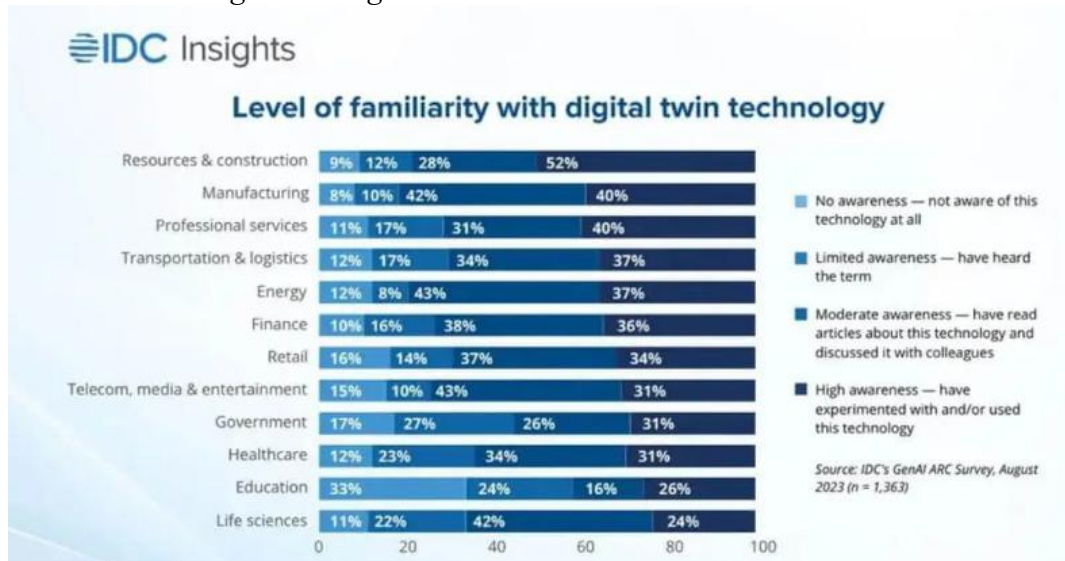
¿Cuándo tiene previsto su empresa priorizar esta iniciativa?



Tomada de (Hexagon, sf).

5.1.4. Nivel de familiaridad en AEC (arquitectura, ingeniería y construcción)

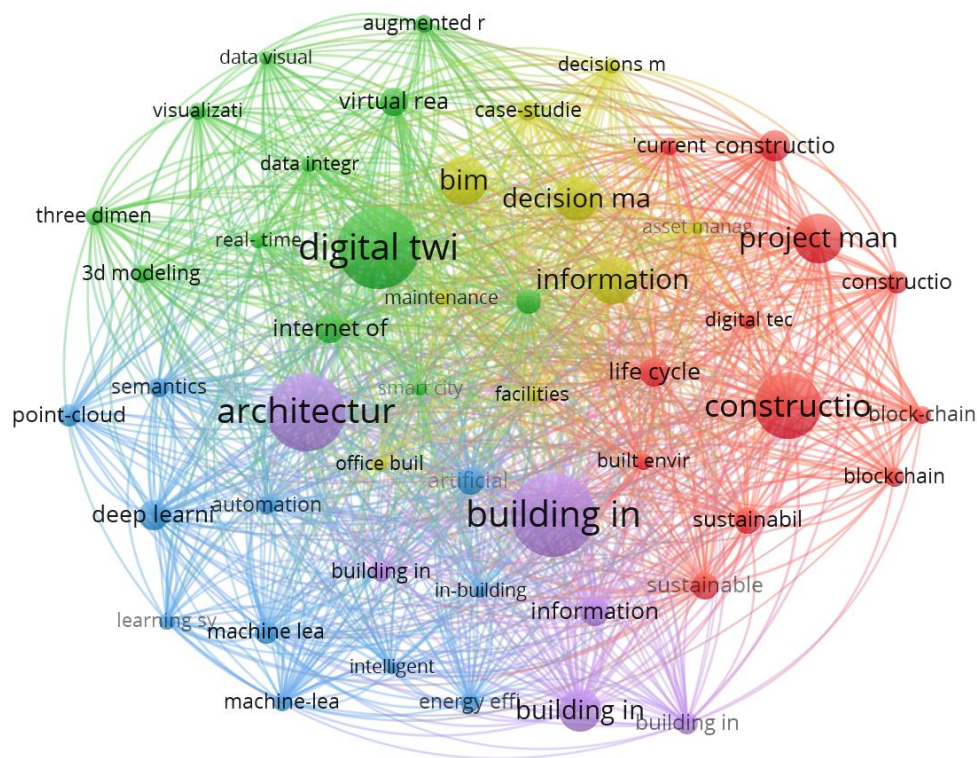
A nivel internacional (datos IDC), el 52 % de profesionales del sector construcción están familiarizados con herramientas de gemelos digitales, en comparación con solo 40 % en manufactura o servicios profesionales.

Figura 8. Familiaridad gemelos digitales

Tomada de (IDC Insights, sf).

Se obtuvieron resultados numéricos de archivos digitales de acuerdo con las palabras claves, obteniendo resultados altamente asociados al concepto de Gemelos digital (Digital Twin), Building Information Modelling, Construcción (Construction), Arquitectura (ARQ), entre otras como se puede ver en la imagen siguiente. Confirmando los resultados asociados a la búsqueda de este documento.

Figura 9. *Estructura metodología de trabajo*



5.2 Describir los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia

Un proyecto de diseño y construcción requiere una serie de componentes para la implementación de un gemelo digital que permiten identificar los aspectos a desarrollar en las

diferentes disciplinas, con el fin de integrar datos y optimizar los procesos durante el ciclo de vida de un proyecto. En diseño y construcción esto nos lleva directamente a la herramienta con la cual se integra toda esta información y que tiene una relación estrecha con el desarrollo del gemelo digital que es el BIM, por medio de modelos que son la base de la cual se partiría para el desarrollo del Gemelo digital, complementado con otras fuentes de información generadas por diferentes herramientas tecnológicas, como datos de sensores, sistemas de gestión de proyectos y dispositivos IoT, que ayudaran a obtener una representación más completa y actualizada del proyecto que ayudaran a visualizar el comportamiento físico del activo ante diferentes situaciones.

Dentro de los elementos que encontramos en la literatura para la implementación de gemelos digitales en las diferentes disciplinas de un proyecto de construcción se destacan principalmente: el modelado 3D, la integración de datos, la simulación y análisis, el monitoreo, la colaboración y el mantenimiento (Tran y Adhikari, 2023).

Modelado 3D (BIM): la base de un gemelo digital para edificaciones es un modelo 3D preciso de las diferentes disciplinas que los componen, arquitectura (ARQ), estructura (EST), ingeniería mecánica, eléctrica e hidrosanitaria (MEP) con todas las especificaciones del proyecto, generado por medio de la metodología BIM (building information modeling), que al integrar los diferentes modelos genera otra información de posibles conflictos mediante modelos federados, que se pueden dar en las etapas de diseño y construcción, ofreciendo una incorporación de datos propias del activo que se van actualizando a lo largo del ciclo de vida del proyecto, creando la base informativa para la generación del gemelo digital.

Integración de datos: se requiere la unificación de información de las diferentes fuentes para alimentar el modelo virtual, como: datos de sensores IoT, instalados en las edificaciones que generan información sobre temperatura, humedad, consumo energético, datos de sistemas de

gestión de proyectos donde se integran elementos provenientes de un modelo vinculados a actividades de obra, cronogramas y costos, datos sobre información de la IoT, con la que se realizan los análisis que genera alertas, datos de sistemas BSM (building systems management), datos de modelos CAD, AVT y datos históricos de registros, para analizar y hacer predicciones sobre el rendimiento del edificio;

En otras palabras, es centralizar la información relevante para que el modelo no se limite solo a la geometría, sino que incluya información en tiempo real, histórica y proyectada sobre el comportamiento del edificio. Esto permite la creación de una réplica digital dinámica para el análisis, el monitoreo continuo y el mantenimiento proactivo para prácticas sostenibles útil para tomar decisiones.

Simulación y análisis: la creación de un gemelo digital permite mediante la simulación analizar el comportamiento del activo ante los diferentes escenarios o posibles inconvenientes que pueda presentar, análisis de riesgo, manejo de planificación de recursos lo que facilita la toma de decisiones y la optimización del proyecto a lo largo del ciclo de vida. El análisis centra en el uso de datos en tiempo real de sensores, así como el uso de algoritmos de aprendizaje automático para estudiar la información y predecir el rendimiento de la edificación.

Monitorización en tiempo real: por medio de la conexión con sensores y dispositivos IoT se puede intercambiar información entre diferentes plataformas lo que hace posible seguir la monitorización en tiempo real del estado del activo, para supervisar, prevenir problemas y gestionar recursos, con el fin de mejorar la eficiencia desde la fase de diseño hasta la operación. El gemelo digital interactúa con el entorno físico para recopilar datos durante las diferentes etapas del ciclo de vida colaborando en la supervisión tanto del proceso constructivo como en el entorno

interior de la edificación en tiempo real de acuerdo con el funcionamiento, que ayuda a resolver problemas con anticipación.

Colaboración e interoperabilidad: este elemento de implementación de gemelo digital facilita intercambio de información con compatibilidad por medio de la colaboración pero se requieren diferentes tecnologías de soporte y formatos de intercambio de datos tales como IFC y MQTT (message queueing telemetry transport), que para la realización del gemelo digital tiene como gran ventaja el intercambio de datos precisos en tiempo real, basado en la sincronización a nivel de objeto que está integrado a dispositivos IoT que se actualizan continuamente por medio de sensores tanto físicos como virtuales, que deja que las tecnologías se integren, con diferentes sistemas y software, que permiten analizar la información relevante del proyecto.

Mantenimiento predictivo: mediante la información integrada del gemelo digital se puede llegar a realizar predicciones del comportamiento de la instalación física y a pronosticar los posibles errores tanto en etapas de diseño como de construcción y componentes de la edificación, gracias a la relación y comunicación bidireccional entre el activo físico y la réplica virtual permitiendo un mantenimiento proactivo que ayude a evitar futuros imprevistos, a través de tecnologías como el IoT, el big data, la simulación multifísica, la Industria 4.0, los sensores en tiempo real, la gestión y el procesamiento de datos, y las perspectivas de la fabricación digital potencian el carácter predictivo y funcional del gemelo digital.

Los elementos descritos generan una serie de beneficios reflejados en la implementación de esta tecnología en las diferentes disciplinas de un proyecto de construcción como por ejemplo: visualización inmersiva del diseño, detección temprana de interferencias, análisis del comportamiento estructural, simulación de cargas y esfuerzos, optimización de materiales y diseño sismorresistente, simulación del funcionamiento de sistemas MEP, detección de conflictos,

optimización del diseño, eficiencia energética, planificación y programación de obras, gestión de recursos, control de calidad y seguridad en obra, monitorización remota, mantenimiento predictivo, gestión de activos, optimización del ciclo de vida del edificio, mayor conocimiento del estado del proyecto, optimización de costos, mejora de la colaboración y toma de decisiones basadas en modelos dinámicos y predictivos.

5.3 Identificar las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia

En la relación entre gemelos digitales y BIM podemos encontrar unas variables, que son esos factores técnicos, organizacionales, normativos y contextuales que podrían tener una injerencia en la adopción de BIM como base para implementación de gemelos digitales para ser integrados en el ciclo de vida de construcción de una edificación. Estas variables permiten determinar cuáles son las oportunidades, inconvenientes y las condiciones presentes en el desarrollo para la adopción de esta tecnología, que permitirá optimizar el proceso constructivo y de mantenimiento de un activo, teniendo como resultado proyectos sostenibles en el tiempo. A continuación, se reconocen cuáles son esas variables y como aparecen en las diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción

Diseño: en términos generales esta variable se da acorde con el tipo de proyecto (infraestructura pública, edificación privada, etc.), escala y complejidad del proyecto, ubicación geográfica (condiciones técnicas y de conectividad), etapa del ciclo de vida (diseño, construcción, operación, mantenimiento), nivel de integración entre modelos BIM y sistemas de gestión de activos.

En la etapa de diseño y planificación de un proyecto de construcción esta variable está presente en el nivel de detalle y precisión de la información que permita conceptualizar y visualizar desde el principio el alcance que se podría llegar a tener. En la etapa de construcción se presenta a nivel de detalle técnico, como sería el funcionamiento físico y la secuencia constructiva de acuerdo con lo previsto en la etapa de diseño, ya desde la etapa de operación y mantenimiento esta variable se presenta las posibilidades de comportamiento de la relación del activo con el entorno físico de acuerdo con toda la información ofrecida por las etapas anteriores.

Implementación: es una variable que se manifiesta en las diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto, partiendo de la definición del nivel de madurez BIM en el proyecto y nivel de implementación BIM (nivel 0, 1, 2 o 3) y toda la base informativa que ofrece el BIM presente en la etapa de diseño y planificación. En la etapa de construcción esta variable aterriza en las herramientas de materialización del proyecto como el uso de estándares BIM nacionales e internacionales (Spain, 2021) la capacitación del personal en BIM de obra, tiempo y presupuesto disponibles para implementar tecnologías digitales. Ya en la etapa de operación y mantenimiento se presenta en las herramientas disponibles para la introducción de la tecnología comprendida como IoT, big data, cloud computing que integran todas las fuentes de datos para la generación de la réplica virtual.

Gestión: esta variable se puede contemplar en la metodología BIM como base de la información para la ejecución de un gemelo digital en las diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto, en la etapa de diseño y planificación esta variable se presenta mediante la información generada por los modelos BIM que se van a integrar con todos los detalles de los componentes de las diferentes disciplinas estableciendo la interoperabilidad entre software BIM y plataformas de gemelos digitales (revit, navisworks, autodesk tandem, bentley itwin, etc.), y nivel de

digitalización en el ciclo de vida del activo . En la etapa de construcción esta variable se manifiesta en el control de la secuencia de construcción, recursos y equipos para la detección predictiva del comportamiento físico del activo en tiempo real. Para la etapa de operación y mantenimiento esta variable se materializa por medio de la tecnología de sensores, que genera toda la información y análisis de datos continuamente en tiempo real para optimizar el rendimiento energético durante la vida útil del activo con un carácter predictivo.

Tecnología: desde la etapa de diseño y planificación esta variable se hace presente mediante modelos integrados con datos de materiales, costos y sostenibilidad con el uso doftware BIM (revit, archiCAD, navisworks), plataformas de colaboración en la nube, herramientas de simulación estableciendo una estructura que se complementara con los datos reales en el tiempo. En la etapa de construcción la tecnología aplicada de sensores IoT, escáneres láser, drones, realidad aumentada y mixta, plataformas de gestión de obra, permitirá la captura y comparación de datos reales del avance de obra con el modelo digital alimentándose de la información directa del activo físico en construcción, para una óptima supervisión y detección de imprevistos. En la etapa de operación y mantenimiento esta variable se muestra por medio una réplica virtual activa en base a sistemas de gestión de edificios (BMS), plataformas IoT, inteligencia artificial, analítica de datos, que recibe datos en tiempo real sobre su funcionamiento, optimizando el rendimiento energético, anticipando posibles fallas y gestionando el mantenimiento preventivo.

Resultados: esta variable se presenta en forma de consecuencia y beneficios en la implementación de esta tecnología, en la etapa de diseño y planificación, el principal beneficio es la visualización anticipada de un proyecto antes de su ejecución y como resultado tenemos modelos enriquecidos para etapas posteriores. En la etapa de construcción vemos que esta variable mediante los datos en tiempo real generados por la tecnología tiene como resultado un mayor

control, con información medible y comparable estableciendo un monitoreo de lo real con respeto a lo planificado, que se actualiza constantemente. Ya dentro de la etapa de operación y mantenimiento la implementación de un gemelo digital completamente desarrollado puede como resultado monitorear el comportamiento del edificio o infraestructura (uso energético, confort térmico, estado de equipos) que ofrece como beneficio optimización y el rendimiento del activo permitiendo la detección temprana de conflictos.

6. Conclusiones

Se proponen los procesos y componentes que, según la literatura, permiten la implementación de gemelos digitales en proyectos de edificaciones con procesos y usos BIM en Colombia.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de gemelos digitales en las diferentes etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción tipo edificación.

Se describen los elementos propios de la implementación de gemelos digitales o “digital twins” en las diferentes disciplinas de diseño y construcción de proyectos de edificaciones en Colombia.

Se identifican las variables que relacionan el uso de gemelos digitales en proyectos de diseño y construcción con implementación BIM en Colombia.

Referencias

- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . In Control and Dynamic Systems Vol. 69 (pp. 133-180). San Diego: Academic Press.
- American Psychological Association. (n.d.). *Style and Grammar Guidelines*. Retrieved enero 17, 2020, from Apastyle: <https://apastyle.apa.org/style-grammar-guidelines>
- Camacol. (2023, 09 08). *Camacol*. Retrieved from ENCUESTA NACIONAL BIM 2023: <https://camacol.co/actualidad/publicaciones/revista-urbana/conexion-bim/encuesta-nacional-bim-2023>
- Chicaiza et al. (2024). El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria*, 25.
- Clarivate. (2025, 07 30). *Web of Science*. Retrieved from DIGITAL TWIN: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/63126319-2e49-4d96-bceb-bd739055e1d7-017164e3f9/relevance/1>
- Constructivo. (2024, 10 04). *BIM FORUM CHILE*. Retrieved from Potenciando la gestión digital de la construcción con BIM y gemelos digitales: <https://bimforum.cl/potenciando-la-gestion-digital-de-la-construccion-con-bim-y-gemelos-digitales/>
- CRAI USTA Bucaramanga. (2020). *Informe de recursos y servicios bibliográficos*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.
- Delgado y Martinez. (2023, Marzo 16). *Arquitectura básica de diseño de gemelos digitales para la construcción*. Retrieved from Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-83062022000200327
- DNP, C. (2022-2026). *Plan Nacional de Desarrollo*. Bogotá: La rebeca intranet.

- Dodge y Analytics. (2012). The Business Value of Building Information Modeling (BIM) for Infrastructure. *Dodge Construction Network*, 1.
- Elsevier. (2025, 07 30). *Scopus*. Retrieved from Digital Twin: <https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&sid=dac874c10d62b0d6c632a94fef73bcab&sot=a&sdt=b&sl=20&s=%28ALL%28DIGITAL+TWIN%29+AND+ALL%28BIM%29%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&txGid=f05dd222023bd6ebaaefad23ec7f2881&sessionSearchId=dac>
- Grieves, M. (2022). Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin*, 24.
- Hauer et al. (2024, marzo 14). *Integrating Digital Twins with BIM for Enhanced Building Control Strategies (2023)*. *Buildings*, MDPI. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/805>
- Inmobiliare. (2022, 06 17). *Plataforma CDT*. Retrieved from Gemelos digitales: Tecnología que reduce hasta 35% los costos de construcción: <https://www.cdt.cl/gemelos-digitales-tecnologia-que-reduce-hasta-35-los-costos-de-construccion/>
- Maulshree et al. (2021, Mayo 24). *Digital Twin: Origin to Future*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36>
- Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes. *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*. Seattle, WA, USA,.
- Ministerio, T. y. (2023, 06 23). *Gobierno de España*. Retrieved from Plan BIM: <https://cibim.transportes.gob.es/>

- Opinión, L. (2024, 08 28). *La Opinión*. Retrieved from Los gemelos digitales, el secreto detrás de las ciudades y empresas inteligentes : <https://www.laopinion.co/empresas/los-gemelos-digitales-el-secreto-detras-de-las-ciudades-y-empresas-inteligentes>
- Quinn et al. (2022). *Buiding Automation System Data Integration with BIM: Data Structura ans Supporting Case Study*. Retrieved from arxiv.org: <https://arxiv.org/abs/2205.05518>
- Radzi A R et al. (2023, enero).). *Relationship between digital twin and building information modeling: a systematic review*. Retrieved from https://www.researchgate.net/:https://www.researchgate.net/publication/367451328_Relationship_between_digital_twin_and_building_information_modeling_a_systematic_review_and_future_directions
- Revolti et al. (2024). From building information modeling to construction digital twin: a conceptual framework. *Production & Manufacturing Research*, 28.
- Sacks, E. y. (2025). *BIM Handbook como fuente base sobre BIM para propietarios y facility manager*. Wiley.
- Sharma A et al. (2020, Diciembre 4). *Digital Twins: State of the Art Theory and Practice*. Retrieved from arxiv.org: <https://arxiv.org/abs/2011.02833>
- Singh et al. (2021, mayo 24). *Digital Twin: Origin to Future*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36>
- Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.
- Spain, B. S. (2021). INTRODUCCIÓN A LA SERIE EN ISO 19650. *Building Smart Spain*, 33.
- Tang. (2023, Febrero 23). *Digital Twins: Legal Considerations*. Retrieved from cliffordchance: <https://www.cliffordchance.com/insights/resources/blogs/talking-tech/en/articles/2023/02/digital-twins-legal-considerations.html>

- Torres, G. (2024, Mayo 24). *Tecnogus*. Retrieved from Construcción e infraestructura, los sectores que empiezan a aprovechar el auge de los Gemelos Digitales en Colombia: https://www.tecnogus.com.co/construccion-e-infraestructura-los-sectores-que-empiezan-a-aprovechar-el-auge-de-los-gemelos-digitales-en-colombia/?utm_source=chatgpt.com
- Tran y Adhikari. (2023, Julio 3). *The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review*. Retrieved from MDPI: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10462>
- Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser . *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.