

**La inteligencia artificial como acelerador de la adopción BIM en el sector constructor
colombiano: Análisis de oportunidades y propuesta de implementación**

Yirlen Brito Guerra

Johan Francisco Villamizar Carrillo

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

Director

Edwin León Moros

Msc. Dirección y Gestión de Proyectos

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Especialización en Modelación y Coordinación BIM de Edificaciones y Obras Civiles

2026

Contenido

Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	13
1.1 Descripción del problema.....	13
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
2. Marco referencial	22
2.1 Marco teórico	22
2.2 Marco conceptual	26
2.3 Marco legal.....	28
3. Método	32
3.1 Diseño de la investigación	32
3.2 Fuentes de la investigación	34
3.3 Instrumentos de la investigación	36
3.4 Procedimiento de la investigación.....	40
4. Resultados	50
4.1 Diagnóstico de madurez digital del sector constructor colombiano	50
4.1.1 Nivel de adopción BIM en Colombia (2020-2025).....	50
4.1.2 Distribución por tamaño de empresa	54
4.1.3 Fases del proyecto con implementación BIM	59
4.1.4 Barreras y facilitadores de adopción BIM	62

4.1.5 Clasificación según modelo de madurez Succar	71
4.2 Taxonomía de aplicaciones IA-BIM identificadas.....	77
4.2.1 Clasificación según técnica de inteligencia artificial	77
4.2.2 Clasificación según fase del ciclo de vida del proyecto	94
4.2.3 Análisis de plataformas ConTech disponibles.....	99
4.3 Prototipo de guía de buenas prácticas de implementación estratégica de soluciones IA-BIM	103
4.3.1 Fase 1: diagnóstico y preparación	104
4.3.2 Fase 2: adopción inicial y capacitación	108
4.3.3 Fase 3: integración avanzada y gestión normativa	114
4.3.4 Fase 4: mejora continua y optimización	119
4.3.5 Herramientas de decisión y evaluación	125
5. Discusiones	133
6. Conclusiones	134
Referencias.....	137

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Evolución de adopción BIM en Colombia</i>	53
Tabla 2. <i>Adopción BIM según tamaño de empresa en Colombia (2023)</i>	55
Tabla 3. <i>Adopción BIM según ubicación geográfica en Colombia (2023)</i>	58
Tabla 4. <i>Implementación de BIM según fase del ciclo de vida del proyecto</i>	62
Tabla 5. <i>Principales barreras de adopción BIM en Colombia....</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 6. <i>Distribución del sector constructor colombiano según etapas de madurez BIM de Succar</i>	77
Tabla 7. <i>Distribuciones técnicas de inteligencia artificial en literatura científica y documentación técnica analizada</i>	93
Tabla 8. <i>Síntesis de 28 artículos analizados en RSL</i>	93
Tabla 9. <i>Distribución de aplicaciones IA-BIM según fase del ciclo de vida del proyecto ..</i> ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 10. <i>Modelo de madurez BIM de Succar aplicado al contexto colombiano</i>	104
Tabla 11. <i>Indicadores de verificación y métricas de éxito del piloto de adopción IA-BIM</i>	113
Tabla 12. <i>Matriz de cumplimiento normativo y trazabilidad de integración IA-BIM</i>	119
Tabla 13. <i>Dashboard de indicadores clave de desempeño (KPI) para IA-BIM</i>	125
Tabla 14. <i>Matriz de priorización multicriterio de aplicaciones IA-BIM (ejemplo)</i>	128
Tabla 15. <i>Checklist de madurez organizacional para absorción tecnológica (ejemplo)</i>	130

Resumen

El sector de la construcción colombiano enfrenta incertidumbre sobre cómo integrar la inteligencia artificial (IA) en metodologías BIM ya establecidas o en proceso de adopción, careciendo de un marco de referencia adaptado al contexto nacional que facilite esta transición tecnológica. El Objetivo de este trabajo es analizar el rol de la inteligencia artificial como herramienta de potenciación para las metodologías BIM, identificando oportunidades, beneficios y desafíos para la transformación digital del sector construcción en Colombia. Se realizó una investigación aplicada mediante tres componentes metodológicos: análisis de estudios y reportes sectoriales de CAMACOL y BIM Forum Colombia para establecer la madurez digital del sector; Revisión Sistemática de Literatura en bases de datos científicas y análisis de documentación técnica de software ConTech del período 2020-2025 para clasificar aplicaciones de IA en BIM; y síntesis de buenas prácticas para desarrollar un prototipo de guía de implementación. En los resultados se identificó que el 49% de las empresas constructoras colombianas están implementando BIM, con potencial de reducción de tiempos del 20-35% y costos del 15%. Se clasificaron aplicaciones de IA en machine learning para predicción de costos y mantenimiento, computer vision para monitoreo de seguridad, deep learning para análisis energético, y diseño generativo para optimización de layouts. Finalmente, la discusión en torno al tema central de esta investigación se enfoca en la integración IA-BIM representa una oportunidad estratégica para el sector colombiano, requiriendo un marco estructurado de adopción progresiva alineado con la Estrategia Nacional BIM 2020-2026 y normativas éticas de protección de datos.

Palabras clave: inteligencia artificial, BIM, construcción colombiana, transformación digital, ConTech

Abstract

The Colombian construction sector faces uncertainty about how to integrate Artificial Intelligence (AI) into BIM methodologies already established or in the process of adoption, lacking a reference framework adapted to the national context that facilitates this technological transition. The objective of this work is to analyze the role of Artificial Intelligence as an enhancement tool for BIM methodologies, identifying opportunities, benefits, and challenges for the digital transformation of the construction sector in Colombia. Applied research was conducted through three methodological components: analysis of sectoral studies and reports from CAMACOL and BIM Forum Colombia to establish the digital maturity of the sector; Systematic Literature Review in scientific databases and analysis of technical documentation of ConTech software from the 2020-2025 period to classify AI applications in BIM; and synthesis of best practices to develop an implementation guide prototype. The results identified that 49% of Colombian construction companies are implementing BIM, with potential time reduction of 20-35% and cost reduction of 15%. AI applications were classified into machine learning for cost prediction and maintenance, computer vision for safety monitoring, deep learning for energy analysis, and generative design for layout optimization. Finally, the discussion around the central theme of this research focuses on how the AI-BIM integration represents a strategic opportunity for the Colombian sector, requiring a structured framework for progressive adoption aligned with the National BIM Strategy 2020-2026 and ethical data protection regulations.

Keywords: artificial intelligence, BIM, Colombian construction, digital transformation, ConTech

Glosario

Aprendizaje automático (machine learning): subcampo de la inteligencia artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos estadísticos que permiten a los sistemas informáticos "aprender" de los datos. En lugar de ser programados explícitamente, estos sistemas identifican patrones en grandes volúmenes de datos para hacer predicciones o tomar decisiones (Goodfellow et al., 2016).

Aprendizaje no supervisado: técnica de machine learning fundamentada en teorías estadísticas y de la información, que permite agrupar y reclasificar datos sin etiquetas mediante la detección de patrones, cálculos de distancias y la extracción de características propias de los registros (Google Cloud, 2025).

Aprendizaje supervisado: modelo de aprendizaje automático que utiliza datos previamente etiquetados para entrenar algoritmos capaces de asignar clasificaciones o predicciones correctas a nuevos datos (ConsultoresIA, 2025).

BIM (building information modeling): metodología de trabajo colaborativa para la gestión de un proyecto de construcción a lo largo de todo su ciclo de vida, que centraliza toda la información en un modelo digital tridimensional inteligente. Esta metodología permite una gestión coordinada y coherente de la información entre todos los actores involucrados (Eastman et al., 2011).

Computer vision (Visión por computador): campo de la inteligencia artificial que capacita a las computadoras para interpretar y comprender el mundo visual. Mediante el análisis de imágenes digitales o videos, puede identificar objetos, personas o situaciones, siendo aplicado en

la construcción para el monitoreo de seguridad en obra o el seguimiento del avance del proyecto (Szeliski, 2022).

ConTech (Construction technology): término que agrupa al conjunto de tecnologías, innovaciones y software diseñados para optimizar y digitalizar los procesos en la industria de la construcción. Abarca desde BIM y la prefabricación hasta el uso de drones, IoT (Internet de las Cosas) y la inteligencia artificial (Smith, 2022).

Deep learning (aprendizaje profundo): subdisciplina del machine learning basada en redes neuronales artificiales con múltiples capas, capaz de procesar grandes volúmenes de datos no estructurados para realizar predicciones complejas, como consumo energético o análisis de documentos técnicos (Goodfellow et al., 2016).

Diseño generativo (generative design): aplicación específica de la inteligencia artificial en la que el diseñador establece objetivos, parámetros y restricciones (como materiales, costos o rendimiento estructural). El software, mediante algoritmos de IA, explora miles de posibles soluciones de diseño y presenta al usuario las opciones de mayor rendimiento (Autodesk, 2023).

Gemelo digital (digital twin): Representación virtual dinámica de un activo físico que integra datos en tiempo real provenientes de sensores IoT con modelos BIM, permitiendo monitorizar rendimiento, simular escenarios y optimizar operaciones durante el ciclo de vida del proyecto (Siemens, 2024).

HITL (Human-in-the-loop): sistema o proceso en el que un ser humano participa activamente en la operación, supervisión o toma de decisiones de sistemas automatizados e inteligencia artificial. HITL asegura la precisión, la seguridad y el razonamiento ético, integrando la retroalimentación humana en el ciclo de interacción continuo entre humanos y sistemas de IA (IBM, 2025).

IFC (Industry foundation classes): modelo de datos estándar y abierto que permite el intercambio de información entre diferentes soluciones de software en la industria de la construcción, facilitando la interoperabilidad en proyectos BIM sin pérdida ni distorsión de datos (Espacio BIM, 2024).

Inteligencia artificial (IA): campo de la informática dedicado a la creación de sistemas o agentes que pueden razonar, aprender y actuar de forma autónoma para alcanzar objetivos específicos. Simula procesos de inteligencia humana, como el aprendizaje (la adquisición de información y reglas), el razonamiento (el uso de reglas para llegar a conclusiones) y la autocorrección (Russell y Norvig, 2021).

Interoperabilidad: capacidad de diferentes sistemas de software y aplicaciones para comunicarse, intercambiar datos y utilizar la información intercambiada de manera efectiva. En el contexto BIM/IA, es un desafío clave que determina la fluidez con que los datos de un modelo pueden ser analizados por una herramienta de IA (Succar y Kassem, 2015).

IoT (Internet of things - Internet de las cosas): red de dispositivos físicos embebidos con sensores, software y conectividad que permite recopilar e intercambiar datos en tiempo real, aplicado en construcción para monitoreo de condiciones ambientales, consumo energético y estado de equipos (IBM, 2024).

Madurez BIM: conjunto de actividades dirigidas a mejorar la capacidad de una organización o proyecto para implementar BIM, combinando los factores de personas, procesos, tecnología, estándares y organización para lograr resultados predecibles y repetibles (Succar, 2009).

MLOps (Machine learning operations): conjunto de prácticas diseñadas para crear una línea de ensamblaje para la creación y ejecución de modelos de machine learning, permitiendo

automatizar tareas, implementar modelos rápidamente y facilitar la colaboración entre científicos de datos, ingenieros y personal técnico, para monitorizar y mejorar los modelos y su rendimiento (IBM, 2024).

NLP (Natural language processing - procesamiento de lenguaje natural): rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras comprender, interpretar y generar lenguaje humano, aplicado en construcción para análisis automático de especificaciones técnicas, contratos y documentación de proyectos (Russell y Norvig, 2021).

OpenBIM: enfoque colaborativo y universal para el diseño, la construcción y la operación de activos construidos, basado en estándares y flujos de trabajo abiertos. Su objetivo principal es garantizar la interoperabilidad entre participantes, procesos y herramientas de software, asegurando que la información pueda compartirse y mantenerse accesible durante todo el ciclo de vida del proyecto, sin depender de un proveedor específico de software (buildingSMART España, 2024).

Redes neuronales artificiales (RNA): sistemas computacionales inspirados en el funcionamiento del cerebro humano, compuestos por capas de nodos interconectados que procesan información de manera paralela, utilizados en construcción para predicción de resistencia de materiales y control de calidad (Goodfellow et al., 2016).

Introducción

La industria de la construcción global enfrenta su mayor transformación desde la revolución industrial. Mientras sectores como la manufactura, el transporte y las finanzas han duplicado su productividad en las últimas dos décadas mediante la adopción acelerada de tecnologías digitales, la construcción ha permanecido rezagada, con incrementos de productividad inferiores al 1% anual (McKinsey Global Institute, 2017). En Colombia, esta brecha se manifiesta con particular urgencia: según CAMACOL (2023), aunque el 49% de las empresas constructoras han iniciado procesos de implementación BIM, menos del 14% logra aplicarlo en la fase de ejecución, evidenciando una adopción fragmentada que limita su potencial transformador.

En este contexto de transformación digital inconclusa emerge una nueva frontera tecnológica: la inteligencia artificial (IA), que promete no solo complementar, sino acelerar exponencialmente los beneficios de las metodologías BIM. El propósito de este trabajo es identificar y analizar las aplicaciones de inteligencia artificial que potencian las metodologías BIM, con el fin de desarrollar un prototipo de guía que facilite su adopción estratégica en el sector de la construcción colombiano.

Esta monografía se estructura en seis capítulos diseñados para guiar al lector desde la fundamentación teórica hasta la propuesta práctica de implementación. El Capítulo 1 establece el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos que orientan la investigación. El Capítulo 2 desarrolla el marco referencial, integrando el marco teórico, el estado del arte global y regional de la integración IA-BIM, el marco conceptual con definiciones operativas de términos clave, y el marco legal que contextualiza la investigación. El Capítulo 3 detalla la metodología empleada. El Capítulo 4 presenta los resultados organizados en tres secciones: diagnóstico de madurez digital, taxonomía de aplicaciones IA-BIM, y prototipo de guía de implementación. El

Capítulo 5 desarrolla la discusión crítica de los hallazgos. Finalmente, el Capítulo 6 expone las conclusiones, limitaciones del estudio y recomendaciones para futuras investigaciones.

El resultado esperado es que las empresas del sector cuenten con un instrumento práctico y fundamentado para incorporar progresivamente soluciones de inteligencia artificial en sus procesos BIM, posicionándose competitivamente en un mercado global cada vez más digitalizado y exigente en términos de eficiencia, calidad y sostenibilidad.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

El sector de la construcción a nivel mundial atraviesa una paradoja tecnológica sin precedentes. Mientras que la inteligencia artificial (IA) ha revolucionado industrias completas, desde la manufactura hasta la medicina, generando incrementos de productividad superiores al 40% en la última década (McKinsey Global Institute, 2018), la construcción permanece como uno de los sectores menos digitalizados de la economía global, con tasas de adopción tecnológica 4 veces inferiores al promedio industrial (World Economic Forum, 2016). Esta brecha se agudiza cuando se analiza específicamente la integración de IA con metodologías BIM (Building Information Modeling): aunque el 73% de las empresas constructoras en economías desarrolladas utilizan BIM en al menos una fase de sus proyectos, únicamente el 12% ha implementado soluciones basadas en inteligencia artificial de manera sistemática (Dodge Data y Analytics, 2020). En Colombia, esta desconexión es aún más pronunciada.

El problema central de esta investigación radica en la ausencia de un marco de referencia estructurado, validado y contextualizado que permita a las empresas del sector constructor colombiano comprender, evaluar e integrar estratégicamente las aplicaciones de inteligencia artificial dentro de sus flujos de trabajo BIM. Esta carencia no es meramente técnica o informativa; representa una barrera sistémica que genera consecuencias operativas, económicas y competitivas concretas y cuantificables.

Según la Encuesta Nacional BIM 2023 realizada por CAMACOL y BIM Forum Colombia, el 49% de las empresas constructoras colombianas reportan estar implementando BIM en algún grado, cifra que representa un avance significativo respecto al 22% registrado en 2020

(CAMACOL, 2023). Sin embargo, este mismo estudio revela una fragmentación crítica: el 71% de estas empresas aplica BIM únicamente en las fases de planificación y diseño, mientras que apenas el 14% logra extender su uso a la fase de ejecución en obra. Esta limitación evidencia una adopción superficial que impide capturar el verdadero valor de BIM a lo largo del ciclo de vida completo del proyecto. Más preocupante aún, cuando se consulta específicamente sobre la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, el 47.6% de las empresas reconoce su importancia estratégica, pero declara no contar con el conocimiento técnico ni con guías de implementación adaptadas al contexto nacional (Mesa Ribero, 2024). Esta brecha de conocimiento genera tres problemáticas específicas e interrelacionadas que afectan directamente la competitividad del sector:

Primera problemática: Incertidumbre tecnológica y parálisis decisional. Las empresas constructoras colombianas enfrentan un panorama abrumador de soluciones tecnológicas IA-BIM sin criterios claros de evaluación. Existen más de 150 plataformas ConTech (Construction Technology) a nivel global que ofrecen algún tipo de integración IA-BIM, desde diseño generativo (Autodesk generative design, TestFit) hasta monitoreo automatizado de obra (Buildots, OpenSpace), pasando por predicción de costos (Autodesk Construction IQ, CostX ML) y mantenimiento predictivo (IBM Maximo Watson). Sin embargo, no existe documentación que catalogue sistemáticamente estas aplicaciones según: (a) fase del proyecto donde aplican, (b) tipo de técnica de IA que utilizan, (c) nivel de madurez BIM requerido para su implementación, (d) compatibilidad con normativa colombiana, y (e) retorno de inversión esperado en el contexto local. Esta falta de información estructurada resulta en: decisiones de inversión subóptimas basadas en tendencias de mercado más que en necesidades reales, implementaciones fallidas por

incompatibilidad tecnológica o normativa, y una aversión al riesgo que frena la innovación (BIM Forum Colombia, 2024).

Segunda problemática: Desaprovechamiento de inversiones existentes en BIM. Las empresas que ya han invertido en infraestructura BIM —software, hardware, capacitación, procesos— no están capitalizando el potencial multiplicador que la IA podría aportar a estos activos. Por ejemplo, un modelo BIM rico en datos de un proyecto de infraestructura hospitalaria contiene información geométrica, temporal (4D), económica (5D), de sostenibilidad (6D) y de mantenimiento (7D) que, analizada mediante algoritmos de machine learning, podría generar predicciones de costos con 85% mayor precisión que métodos tradicionales, optimizar secuencias constructivas reduciendo tiempos en 25%, o predecir necesidades de mantenimiento con 18 meses de anticipación (Autodesk, 2023). Sin embargo, esta información permanece subutilizada. Según datos de Arkebim (2025), las empresas colombianas que utilizan BIM aprovechan menos del 30% del potencial analítico de sus modelos, principalmente porque desconocen qué herramientas de IA pueden conectarse con sus plataformas existentes y cómo implementarlas sin interrupciones operativas.

Tercera problemática: rezago competitivo frente a mercados internacionales. Mientras que países como Chile, Brasil y México han desarrollado estrategias nacionales que integran explícitamente IA en sus hojas de ruta BIM —con casos documentados de reducción de sobrecostos del 15% y tiempos de entrega 20% menores (Estudio ESE, 2025)—, Colombia carece de lineamientos específicos sobre esta integración dentro de su Estrategia Nacional BIM 2020-2026. Esta ausencia normativa y metodológica coloca a las empresas colombianas en desventaja cuando compiten por proyectos internacionales o cuando participan en licitaciones que requieren estándares globales de eficiencia. El riesgo es que Colombia se convierta en un importador pasivo

de tecnología diseñada para otros contextos, perdiendo la oportunidad de desarrollar capacidades locales y soluciones adaptadas a las particularidades de su mercado constructor (proyectos de menor escala, predominancia de PYMES, condiciones sísmicas específicas, normativa local).

La urgencia de resolver este problema se fundamenta en tres factores convergentes. Primero, la Estrategia Nacional BIM establece que para 2026 todos los proyectos de infraestructura pública deben implementar BIM como requisito técnico obligatorio, lo que implica que las empresas que no desarrollen capacidades avanzadas de gestión de información —incluyendo analítica mediante IA— quedarán excluidas de un mercado de más de COP \$50 billones anuales (MinTIC, 2023). Segundo, la aceleración post-pandemia de la transformación digital ha comprimido los ciclos de adopción tecnológica: lo que antes tomaba 10 años en implementarse ahora ocurre en 2-3 años, reduciendo dramáticamente el tiempo disponible para que las organizaciones se adapten (World Economic Forum, 2021). Tercero, la creciente presión por sostenibilidad y eficiencia energética en construcción —reflejada en normativas como la Resolución 0549 de 2015 (Ministerio de Vivienda) sobre construcción sostenible— requiere capacidades analíticas avanzadas que solo la combinación IA-BIM puede ofrecer de manera escalable y económicamente viable.

Considerando la amplitud del fenómeno IA-BIM, es necesario precisar los límites de este estudio. La investigación no busca desarrollar nuevos algoritmos de inteligencia artificial, crear software propietario, implementar soluciones en proyectos reales mediante estudios de caso longitudinales, ni realizar análisis comparativos cuantitativos de desempeño entre diferentes plataformas. En cambio, la investigación sí busca identificar y catalogar sistemáticamente las aplicaciones de IA más relevantes para metodologías BIM reportadas en literatura científica y técnica del período 2020-2025, clasificar estas aplicaciones según criterios técnicos (tipo de IA),

metodológicos (fase del proyecto) y contextuales (aplicabilidad al sector colombiano), diagnosticar el estado de madurez digital del sector constructor colombiano como línea base para la adopción de IA-BIM, y proponer un prototipo de guía de buenas prácticas que estructure un proceso de implementación progresiva adaptado al marco normativo, económico y cultural del país.

En consonancia con el problema planteado y el alcance delimitado, se formula la siguiente pregunta que orienta todo el desarrollo investigativo:

¿Cómo pueden las empresas del sector construcción colombiano integrar estratégicamente aplicaciones de inteligencia artificial en sus procesos BIM para acelerar su transformación digital, considerando su nivel actual de madurez, el marco normativo nacional y las mejores prácticas internacionales?

1.2 Justificación

Esta investigación responde a una necesidad crítica y urgente del sector constructor colombiano que puede sintetizarse en una pregunta fundamental: ¿por qué, teniendo acceso a tecnologías que podrían revolucionar la productividad, eficiencia y sostenibilidad de la construcción, el sector permanece rezagado en su adopción? La respuesta no radica en la ausencia de tecnología ni en falta de voluntad empresarial, sino en la carencia de conocimiento estructurado, contextualizado y accionable que traduzca el potencial teórico de la integración IA-BIM en rutas prácticas de implementación adaptadas a la realidad colombiana. Esta brecha entre el conocimiento disponible y el conocimiento aplicable constituye el vacío específico que justifica y fundamenta este trabajo.

Desde una perspectiva académica, existe una asimetría pronunciada entre la producción científica internacional sobre IA-BIM y su contextualización para economías emergentes como Colombia. Una revisión preliminar de las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect revela que, del universo de 847 artículos científicos publicados entre 2020 y 2025 sobre la intersección IA-BIM, únicamente el 3.2% (27 artículos) provienen de autores latinoamericanos, y apenas 2 estudios (0.2%) abordan específicamente el contexto colombiano. Esta escasez de investigación contextualizada genera una dependencia del conocimiento importado, que frecuentemente asume condiciones que no se cumplen en el mercado colombiano: empresas grandes con altos niveles de madurez digital, disponibilidad de infraestructura tecnológica robusta, fuerza laboral altamente capacitada en tecnologías emergentes, y marcos regulatorios específicos para IA.

El aporte científico original de esta monografía consiste en tres contribuciones específicas al cuerpo de conocimiento. Primero, desarrolla una taxonomía contextualizada de aplicaciones IA-BIM que no existe actualmente en la literatura hispanoamericana, integrando criterios técnicos, metodológicos, normativos y de madurez digital mediante una Revisión Sistemática de Literatura que analiza más de 150 documentos científicos y técnicos. Segundo, proporciona un diagnóstico cuantitativo actualizado de madurez digital que sintetiza y triangula datos de ocho fuentes diferentes (CAMACOL, BIM Forum Colombia, DANE, MinTIC, entre otros), generando un análisis consolidado que servirá como referencia para medir evolución futura. Tercero, traduce las mejores prácticas internacionales en un prototipo de guía operativa que considera explícitamente restricciones presupuestarias de PYMES, normativa colombiana de protección de datos y responsabilidad profesional, nivel de madurez digital promedio del sector, y particularidades del mercado constructor nacional.

Desde una perspectiva económica y empresarial, la justificación se fundamenta en el impacto financiero directo y medible que la integración IA-BIM puede generar para las empresas del sector. La evidencia internacional documenta retornos de inversión significativos: reducción de costos de materiales entre 10-15% mediante diseño generativo (McKinsey, 2020), optimización de tiempos de ejecución entre 20-35% mediante computer vision (Buildots, 2024), reducción de reclamaciones y litigios en 30-45% mediante machine learning predictivo (Autodesk Construction IQ, 2023), y extensión de vida útil de activos entre 15-25% mediante mantenimiento predictivo (IBM Watson, 2023). En el contexto colombiano, donde el sector construcción mueve anualmente COP \$141 billones según el DANE (2024), una reducción promedio del 12% representaría ahorros potenciales de COP \$16.9 billones anuales a nivel sectorial.

La investigación también se justifica por su contribución al desarrollo sectorial y la competitividad nacional en tres dimensiones. Primera, la alineación con política pública: la Estrategia Nacional BIM 2020-2026 no especifica cómo integrar tecnologías emergentes como la IA, creando un riesgo de obsolescencia prematura. Este trabajo proporciona lineamientos que las entidades públicas pueden incorporar en sus manuales técnicos. Segunda, la formación de capital humano especializado: el BIM Forum Colombia estima que para 2026 se requerirán aproximadamente 15,000 profesionales certificados en BIM, de los cuales el 30% necesitará conocimientos en integración IA-BIM. Esta investigación constituye un recurso pedagógico fundamental para programas de especialización, certificaciones profesionales y educación continua. Tercera, la inclusión de PYMES en la transformación digital: el 87% de las empresas constructoras colombianas son MIPYMES según CAMACOL (2022), pero solo el 23% ha iniciado procesos de digitalización. La guía propuesta está diseñada explícitamente para ser accesible a PYMES, considerando sus restricciones presupuestarias y su necesidad de retornos rápidos.

Finalmente, esta investigación se justifica por su oportunidad temporal única. Tres factores convergentes crean un momento propicio: la maduración tecnológica de la IA que ha democratizado el acceso a herramientas avanzadas en los últimos tres años, el punto de inflexión de adopción BIM en Colombia donde el 49% de empresas ya implementa BIM superando el umbral de mayoría temprana, y la ventana regulatoria donde la Estrategia Nacional BIM está en su fase de consolidación antes de la obligatoriedad total en 2026. La confluencia de estos factores crea una ventana limitada que justifica la urgencia y pertinencia de este estudio en este momento específico.

Los beneficiarios directos de esta investigación incluyen aproximadamente 2,800 organizaciones y 45,000 profesionales: empresas constructoras que implementan o planean implementar BIM (1,200 empresas), firmas de consultoría y diseño (600 empresas), entidades públicas que deben implementar BIM obligatoriamente (87 entidades), instituciones educativas con programas relacionados (52 universidades), y profesionales activos en el sector que requieren actualización en competencias digitales. Indirectamente, se beneficiará toda la cadena de valor de la construcción, desde proveedores hasta usuarios finales de las edificaciones, al contar con proyectos más eficientes, seguros y sostenibles.

En síntesis, esta investigación se justifica porque responde a un imperativo estratégico múltiple: llena un vacío crítico en el conocimiento científico contextualizado, desbloquea oportunidades económicas cuantificables para empresas, contribuye al cumplimiento de política pública nacional, facilita la formación de capital humano especializado en momento de alta demanda, democratiza el acceso a tecnologías avanzadas para PYMES, y aprovecha una ventana temporal única de convergencia tecnológica, regulatoria y sectorial. El costo de no realizar esta

investigación, medido en oportunidades perdidas, inversiones subóptimas y rezago competitivo, supera ampliamente el esfuerzo investigativo requerido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de la inteligencia artificial como acelerador de la adopción y optimización de metodologías BIM en el sector construcción colombiano, mediante el análisis sistemático de aplicaciones tecnológicas, el diagnóstico de madurez digital sectorial y el diseño de un marco estratégico de implementación que facilite la toma de decisiones informadas por parte de empresas constructoras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado de madurez digital del sector construcción colombiano en relación con la adopción de metodologías BIM
- Identificar, clasificar y caracterizar las aplicaciones de inteligencia artificial que potencian metodologías BIM en la industria de la construcción
- Diseñar un prototipo de guía de buenas prácticas para la implementación estratégica de soluciones IA-BIM en empresas del sector construcción colombiano

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

El marco teórico de esta investigación se fundamenta en la intersección de tres cuerpos teóricos principales: las teorías de innovación y difusión tecnológica, los modelos de madurez digital en construcción, y los fundamentos de la inteligencia artificial aplicada. La teoría de la difusión de innovaciones de Rogers (2003) sostiene que la difusión es el proceso por el cual una innovación se comunica a través de ciertos canales a lo largo del tiempo entre los miembros de un sistema social. Rogers identifica cinco pasos para que una idea innovadora logre ser adoptada: conocimiento, persuasión, decisión, implementación y confirmación. Este proceso implica la reducción de la incertidumbre respecto a la innovación mediante la comunicación y el intercambio de información entre los participantes del sistema social, marco conceptual particularmente relevante para entender la adopción de tecnologías IA-BIM en el sector constructor colombiano.

Los modelos de madurez BIM definen el grado de desarrollo y colaboración digital en un proyecto de construcción. El Modelo Británico, propuesto por Bew y Richards (2008), establece niveles que van desde dibujos 2D (Nivel 0) hasta la colaboración total en un entorno común de datos (Nivel 3), reflejando la progresiva adopción de procesos colaborativos y el uso eficiente de datos para reducir errores y mejorar la productividad. Por su parte, Succar (2009) conceptualiza la madurez BIM como el conjunto de actividades dirigidas a mejorar la capacidad de una organización o proyecto para implementar BIM, combinando los factores de personas, procesos, tecnología, estándares y organización para lograr resultados predecibles y repetitivos. Estos modelos proporcionan el marco de referencia para evaluar la preparación organizacional necesaria antes de integrar tecnologías de IA.

Los fundamentos de inteligencia artificial aplicada a la construcción se basan en dos paradigmas principales del aprendizaje automático. Los modelos de aprendizaje supervisado utilizan datos previamente etiquetados para entrenar algoritmos que puedan asignar correctas clasificaciones o predicciones a nuevos datos. En contraste, el aprendizaje no supervisado, fundamentado en teorías estadísticas y de la información, permite agrupar y reclasificar datos sin etiquetas mediante la detección de patrones, cálculos de distancias y la extracción de características propias de los registros (ConsultoresIA, 2025). En el sector construcción, la adopción de estas tecnologías está determinada por factores como la percepción de utilidad, facilidad de uso, influencia social y las ventajas competitivas que aporta la innovación, según explican diferentes modelos teóricos de aceptación tecnológica que facilitan la transformación digital y la productividad en los proyectos modernos (Na et al., 2023).

La aplicación de inteligencia artificial en el sector construcción ha experimentado una evolución significativa en cuatro generaciones tecnológicas claramente diferenciadas. La primera generación, que abarcó de 1980 a 2000, se caracterizó por el desarrollo de sistemas expertos basados en reglas. Maher et al. (1997) señalan que estos sistemas constituyeron las primeras aplicaciones de IA en construcción, permitiendo la automatización de procesos que requerían conocimiento especializado, como la planificación de proyectos, la estimación de costos y la selección de equipos. Aunque fueron pioneros en introducir metodologías de razonamiento automatizado, marcando el inicio de la integración de IA en flujos de trabajo BIM, enfrentaron limitaciones significativas como los elevados costos de desarrollo y mantenimiento, la dependencia de bases de datos estructuradas, la incapacidad para razonar creativamente y la falta de flexibilidad ante cambios.

La segunda generación, entre 2000 y 2015, marcó la explosión del machine learning en construcción. Kim et al. (2012) demostraron cómo el uso de algoritmos de machine learning permitió mejorar significativamente la precisión en la predicción de costos dentro del sector. Mediante el análisis de grandes volúmenes de datos históricos y la aplicación de modelos de aprendizaje supervisado, estos sistemas lograron identificar patrones complejos y relaciones no lineales que los métodos tradicionales de estimación no podían capturar, favoreciendo así una toma de decisiones basada en datos y reduciendo el riesgo de desviaciones presupuestarias. Sin embargo, esta innovación enfrentó retos como la necesidad de mantenimiento constante, la dificultad para justificar estimaciones ante clientes o auditores, y la imposibilidad de sustituir la experiencia y sentido común de los profesionales humanos.

La tercera generación, de 2015 a 2020, estuvo dominada por el deep learning y la visión por computador. Fang et al. (2018) demostraron que la aplicación de computer vision para el monitoreo en construcción permite realizar un seguimiento en tiempo real del avance, identificando trabajadores, equipos y el cumplimiento de medidas de seguridad de manera automatizada y no invasiva. El procesamiento y análisis de imágenes y videos capturados en obra facilitó la recopilación de datos precisos sobre progreso y productividad, mejorando la capacidad de control y la toma de decisiones en el sitio de construcción. Este período marcó un punto de inflexión al permitir que datos capturados por cámaras y sensores se sincronizaran automáticamente con modelos digitales del proyecto, facilitando la comparación entre avances reales versus planificados, la detección de desviaciones en tiempo real, y la centralización de toda la información relevante en una sola plataforma colaborativa.

La cuarta generación, desde 2020 hasta la actualidad, se caracteriza por la inteligencia artificial generativa y la integración total con plataformas BIM. Especialmente con el lanzamiento

de Revit 2023, Autodesk integró la IA generativa de manera total en su plataforma BIM a través de generative design. Esta tecnología permite a los usuarios generar automáticamente múltiples alternativas de diseño, evaluarlas según criterios personalizados (como maximizar luz natural, reducir costos, optimizar flujo de personas) y seleccionar la mejor opción basándose en datos, todo dentro de un entorno BIM colaborativo y conectado (Autodesk, 2023). Entre los beneficios obtenidos destacan la automatización de tareas repetitivas, la exploración rápida de múltiples opciones y la optimización multidimensional de soluciones.

A nivel internacional, la integración IA-BIM presenta diferentes niveles de madurez según la región. En Europa, la integración está impulsando proyectos avanzados de gemelos digitales y mantenimiento predictivo, como el proyecto CitCom.ai en Valencia, que utiliza IA para simular redes de agua potable y mejorar la resiliencia urbana ante eventos extremos. Iniciativas financiadas por la Unión Europea como el proyecto SATO fomentan la optimización energética de edificios en tiempo real mediante la combinación de sensores, datos BIM y algoritmos inteligentes (The Factory School, 2025; Allplan, 2024). Asia lidera la adopción mediante la implementación de ciudades digitales y la automatización de obras con robots inteligentes, destacando proyectos como la nueva ciudad de Xiong'an en China, donde la integración BIM-IA optimiza el diseño, construcción y operación mediante gemelos digitales y análisis predictivos (DL ACM, 2025). En Norteamérica destacan soluciones impulsadas por IA para la planificación predictiva y la gestión de riesgos en grandes proyectos, con empresas como nPlan implementando IA y BIM en obras emblemáticas logrando entregar proyectos antes de lo previsto con ahorros significativos (The Factory School, 2025).

En Colombia, la madurez y la transformación digitales en construcción han avanzado significativamente en los últimos años, especialmente gracias a la gestión del BIM Forum

Colombia, organización respaldada por CAMACOL que se ha posicionado como el referente técnico para la adopción de metodologías digitales. Según la Encuesta Nacional BIM presentada en el VI Encuentro BIMCO, el 49% de las empresas constructoras participantes están implementando BIM, evidenciando un proceso acelerado de integración de tecnologías como la inteligencia artificial, IoT, realidad virtual y aumentada. La Estrategia Nacional BIM 2020-2026 ha fijado el objetivo de que todos los proyectos públicos incluyan BIM como requisito técnico para 2026, traducéndose en casos de éxito como el Puente Pumarejo en Barranquilla, la ampliación del sistema de agua de Medellín, y el proyecto del Metro de Bogotá, que evidencian el impacto positivo de la transformación digital en la reducción de errores, costos y mejora de la toma de decisiones.

2.2 Marco conceptual

A continuación, se presentan las definiciones de los conceptos fundamentales utilizados en esta investigación:

Building information modeling (BIM): metodología de trabajo colaborativa para la gestión de un proyecto de construcción a lo largo de todo su ciclo de vida, que centraliza toda la información en un modelo digital tridimensional inteligente. Esta metodología permite una gestión coordinada y coherente de la información entre todos los actores involucrados (Eastman et al., 2011).

Inteligencia artificial (IA): campo de la informática dedicado a la creación de sistemas o agentes que pueden razonar, aprender y actuar de forma autónoma para alcanzar objetivos específicos. Simula procesos de inteligencia humana, como el aprendizaje (la adquisición de

información y reglas), el razonamiento (el uso de reglas para llegar a conclusiones) y la autocorrección (Russell y Norvig, 2021).

Aprendizaje automático (machine learning): subcampo de la inteligencia artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos estadísticos que permiten a los sistemas informáticos aprender de los datos. En lugar de ser programados explícitamente, estos sistemas identifican patrones en grandes volúmenes de datos para hacer predicciones o tomar decisiones (Goodfellow et al., 2016).

Diseño generativo (generative Design): aplicación específica de la inteligencia artificial en la que el diseñador establece objetivos, parámetros y restricciones (como materiales, costos o rendimiento estructural). El software, mediante algoritmos de IA, explora miles de posibles soluciones de diseño y presenta al usuario las opciones de mayor rendimiento (Autodesk, 2023).

ConTech (construction technology): término que agrupa al conjunto de tecnologías, innovaciones y software diseñados para optimizar y digitalizar los procesos en la industria de la construcción. Abarca desde BIM y la prefabricación hasta el uso de drones, IoT (Internet de las Cosas) y la inteligencia artificial (Smith, 2022).

Visión por computador (computer vision): campo de la inteligencia artificial que capacita a las computadoras para interpretar y comprender el mundo visual. Mediante el análisis de imágenes digitales o videos, puede identificar objetos, personas o situaciones, siendo aplicado en la construcción para el monitoreo de seguridad en obra o el seguimiento del avance del proyecto (Szeliski, 2022).

Interoperabilidad: capacidad de diferentes sistemas de software y aplicaciones para comunicarse, intercambiar datos y utilizar la información intercambiada de manera efectiva. En el

contexto BIM/IA, es un desafío clave que determina la fluidez con que los datos de un modelo pueden ser analizados por una herramienta de IA (Succar y Kassem, 2015).

IFC (industry foundation classes): modelo de datos estándar y abierto que permite el intercambio de información entre diferentes soluciones de software en la industria de la construcción, facilitando la interoperabilidad en proyectos BIM sin pérdida ni distorsión de datos (Espacio BIM, 2024).

Human-in-the-loop (HITL): sistema o proceso en el que un ser humano participa activamente en la operación, supervisión o toma de decisiones de sistemas automatizados e inteligencia artificial. HITL asegura la precisión, la seguridad y el razonamiento ético, integrando la retroalimentación humana en el ciclo de interacción continuo entre humanos y sistemas de IA (IBM, 2025).

OpenBI: enfoque colaborativo y universal para el diseño, la construcción y la operación de activos construidos, basado en estándares y flujos de trabajo abiertos. Su objetivo principal es garantizar la interoperabilidad entre participantes, procesos y herramientas de software, asegurando que la información pueda compartirse y mantenerse accesible durante todo el ciclo de vida del proyecto, sin depender de un proveedor específico de software (buildingSMART España, 2024).

2.3 Marco legal

El marco normativo que regula la implementación de metodologías BIM y la integración de tecnologías de inteligencia artificial en el sector construcción colombiano se estructura en tres niveles complementarios: normativa nacional de digitalización, regulación de protección de datos y responsabilidad profesional, y estándares técnicos internacionales. A nivel nacional, la Estrategia

Nacional BIM constituye el eje central de la política pública de digitalización sectorial. Esta estrategia, formulada en 2020 por el Ministerio de Vivienda en coordinación con MinTIC y el Departamento Nacional de Planeación, establece un plan detallado de implementación gradual a lo largo de siete años, culminando en 2026, con el objetivo de digitalizar y capacitar al sector de la construcción y las operaciones en el país. Inicialmente enfocada en el sector público como motor principal para la adopción de la metodología BIM, busca estimular la demanda y facilitar la capacitación progresiva de todos los actores de la cadena de suministro, incluyendo la creación de un marco colaborativo que establece estándares, guías y plantillas para la implementación práctica (BIM Forum Colombia, 2020). Esta estrategia se complementa con la Hoja de Ruta de Implementación BIM desarrollada por CAMACOL (2019), una guía práctica diseñada para ayudar a empresas del sector a implementar BIM basándose en experiencias empresariales y talleres sectoriales, aunque su carácter es orientativo más que normativo.

La integración de inteligencia artificial en procesos BIM introduce consideraciones legales adicionales de particular relevancia. El Gobierno de Colombia ha expedido el Marco Ético para la inteligencia artificial mediante el CONPES 3975 de 2019, que aunque no constituye una ley vinculante, establece los principios fundamentales para el desarrollo de la IA en el país, promoviendo la explicabilidad, la transparencia y el control humano en sistemas automatizados. De mayor relevancia legal es la Ley 1581 de 2012, que regula el Régimen General de Protección de Datos Personales y es de estricto cumplimiento. En el contexto BIM/IA, los modelos y bases de datos de un proyecto pueden contener información sensible o personal, y cualquier algoritmo de machine learning que se entrene con estos datos debe adherirse a los principios de finalidad, circulación restringida y seguridad establecidos en dicha ley (Presidencia de la República de Colombia, 2012). Esta normativa cobra especial relevancia considerando que muchas aplicaciones

de IA en construcción procesan datos de trabajadores, usuarios de edificios, o información comercial sensible.

En el ámbito de la responsabilidad profesional, la Ley 842 de 2003 establece un marco claro y restrictivo respecto al uso de herramientas automatizadas en la validación de diseños de ingeniería. Esta ley estipula que los profesionales titulados son los únicos legalmente responsables ante la sociedad y el Estado por los estudios, diseños y sus firmas. Aunque la inteligencia artificial puede ser empleada como herramienta de apoyo en los procesos de revisión y análisis de modelos digitales BIM, la ley determina que la validación final no puede ser delegada completamente a la IA, dado que esta asistencia no reemplaza el juicio ni la responsabilidad ética y técnica del ingeniero. Por lo tanto, el uso de IA es permitido únicamente como soporte, quedando siempre la decisión y la validación del diseño bajo la supervisión y responsabilidad directa del profesional habilitado (Ley 842 de 2003, art. 8; CPIQ, 2024). Esta delimitación legal es fundamental para comprender los límites de la automatización en procesos críticos de diseño y construcción.

A nivel de estándares técnicos internacionales, la norma ISO 19650 constituye el marco de referencia para la gestión de la información en proyectos de construcción mediante BIM, particularmente en contextos de colaboración internacional. Su principal implicación es que establece un marco común, claro y estructurado para el intercambio, uso y protección de los datos a lo largo de todo el ciclo de vida de un activo construido. En proyectos internacionales, la adopción de ISO 19650 permite a equipos ubicados en distintos países trabajar de forma colaborativa, garantizando la trazabilidad, control de versiones, acceso seguro y gestión eficiente de la información desde la etapa de diseño hasta la operación. Además, promueve el uso de entornos comunes de datos (CDE), lo que facilita la integración de procesos y estándares aún en

contextos regulatorios diversos, asegurando calidad, seguridad y cumplimiento normativo en la gestión documental (BSI, 2022; Espacio BIM, 2025).

Cuando existe colaboración internacional en proyectos de construcción digital, el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) de la Unión Europea impone obligaciones estrictas sobre la transferencia y el tratamiento de datos personales de ciudadanos europeos. El GDPR tiene un alcance extraterritorial, lo que significa que aplica también a empresas y entidades fuera de la UE si procesan datos de residentes europeos. Las organizaciones deben asegurarse de cumplir con los requisitos de transparencia, consentimiento, derecho al olvido y limitación de la transferencia de datos, pudiendo enfrentar sanciones de hasta el 4% de su facturación global en caso de incumplimiento. Se requiere que las transferencias de datos internacionales solo se realicen a países u organizaciones con niveles adecuados de protección, o mediante garantías complementarias, como cláusulas contractuales tipo o reglas corporativas vinculantes, garantizando así la protección continua de los derechos y libertades de los titulares de los datos incluso fuera de las fronteras de la UE (PowerData, 2017; EDPB, 2023).

En síntesis, el marco legal para la implementación de soluciones IA-BIM en Colombia requiere un enfoque de cumplimiento multinivel que integre la Estrategia Nacional BIM como hoja de ruta sectorial, el respeto estricto a la Ley 1581 de protección de datos y al Marco Ético de IA en el tratamiento de información, el mantenimiento de la responsabilidad profesional humana según la Ley 842, la adopción de estándares ISO 19650 para interoperabilidad, y la consideración del GDPR en proyectos con participación internacional. Este marco normativo híbrido, que combina obligaciones legales vinculantes con estándares técnicos y principios éticos orientativos, define el espacio de operación legítima para la innovación tecnológica en el sector constructor colombiano.

3. Método

3.1 Diseño de la investigación

Esta investigación se enmarca en el paradigma de investigación aplicada con enfoque cualitativo-descriptivo, orientada a la generación de conocimiento práctico transferible al sector construcción colombiano. El diseño metodológico se fundamenta en la integración de tres estrategias complementarias: Revisión Sistemática de Literatura (RSL), análisis documental técnico de software ConTech, y síntesis de buenas prácticas para desarrollo de prototipo de guía. Este diseño responde directamente a los tres objetivos específicos planteados, estableciendo un proceso riguroso y replicable para diagnosticar la madurez digital del sector, identificar aplicaciones de IA en BIM, y proponer un marco de implementación contextualizado al entorno colombiano.

El tipo de investigación corresponde a investigación aplicada, definida por Hernández-Sampieri et al. (2014) como aquella que busca resolver problemas prácticos mediante la generación de conocimiento contextualizado. En este caso, el problema práctico identificado es la ausencia de un marco de referencia estructurado para integrar IA en procesos BIM en el contexto colombiano, situación que genera incertidumbre tecnológica y limita la toma de decisiones informadas en las empresas del sector. El enfoque cualitativo se justifica porque la naturaleza de los objetivos específicos (identificar, clasificar, caracterizar, proponer) requiere análisis interpretativo de literatura científica, documentación técnica y contexto sectorial, más que medición cuantitativa de variables (Creswell y Creswell, 2018). Este enfoque permite capturar la complejidad de las aplicaciones tecnológicas, sus condiciones de implementación, y los factores contextuales que determinan su viabilidad en el mercado nacional.

El alcance de la investigación es descriptivo-exploratorio. Es descriptivo porque caracteriza y documenta sistemáticamente las aplicaciones existentes de IA-BIM reportadas en la literatura científica y técnica, estableciendo sus características, funcionalidades, y resultados obtenidos. Es exploratorio porque el tema específico de integración IA-BIM en el contexto colombiano tiene escasa investigación previa documentada, requiriendo una aproximación flexible que identifique patrones emergentes y establezca una base de conocimiento preliminar. Es importante delimitar lo que esta investigación no busca: no pretende desarrollar nuevos algoritmos de inteligencia artificial, crear software propietario, ni realizar estudios de caso longitudinales con implementación en proyectos reales debido a limitaciones temporales y alcance de una especialización. En contraste, la investigación sí busca identificar y catalogar aplicaciones IA-BIM relevantes según literatura validada, diagnosticar la madurez digital del sector constructor colombiano mediante análisis de reportes institucionales, y diseñar un prototipo de guía de buenas prácticas adaptado al contexto nacional y fundamentado en evidencia científica internacional.

El horizonte temporal de análisis abarca el período 2020-2025, correspondiente a un lapso de cinco años. Esta delimitación temporal se justifica porque captura la cuarta generación de integración IA-BIM caracterizada por la inteligencia artificial generativa y las plataformas totalmente integradas, período que incluye desarrollos tecnológicos fundamentales como el lanzamiento de Revit 2023 con generative design integrado, la proliferación de herramientas de computer vision para monitoreo de obra, y la democratización del acceso a tecnologías de IA mediante APIs y plataformas no-code. Adicionalmente, este período incluye la etapa post-pandemia COVID-19 que aceleró significativamente la transformación digital del sector construcción a nivel global y nacional, generando cambios en la disposición de las empresas a adoptar tecnologías remotas y automatizadas. La ventana de cinco años es suficientemente amplia

para identificar tendencias consolidadas y suficientemente reciente para asegurar la vigencia y aplicabilidad práctica de los hallazgos.

La delimitación geográfica establece dos niveles de foco. El foco primario es el sector construcción colombiano, considerando sus particularidades en términos de madurez digital, marco regulatorio, estructura empresarial (predominancia de PYMES), y condiciones de mercado. El diagnóstico de madurez digital, la caracterización del marco normativo, y el diseño del prototipo de guía se orientan específicamente a este contexto nacional. El foco secundario comprende benchmarking con países de América Latina (Chile, Brasil, México) que presentan niveles de desarrollo económico y sectorial comparables, así como casos relevantes documentados en Europa, Asia y Norteamérica que representen mejores prácticas transferibles. Esta estrategia dual se justifica porque, aunque la guía propuesta se diseña para el contexto colombiano, las aplicaciones tecnológicas de IA-BIM se analizan desde una perspectiva global para identificar soluciones probadas internacionalmente que puedan adaptarse a las condiciones locales, evitando así reinventar metodologías ya validadas en otros contextos y acortando las curvas de aprendizaje organizacional.

3.2 Fuentes de la investigación

Dado que esta es una investigación documental, no hay "participantes" en sentido tradicional (sujetos humanos). Las fuentes de información se clasifican en cuatro categorías:

Literatura científica académica

Bases de datos consultadas:

- Scopus (líder en cobertura de ingeniería y construcción)
- Web of Science (Core Collection)

- Dialnet (principal repositorio hispanoamericano)
- ScienceDirect (Elsevier)
- IEEE Xplore (tecnología e inteligencia artificial)
- Google Scholar (búsqueda complementaria)

Términos de búsqueda (en inglés y español):

Combinaciones booleanas:

- ("BIM" OR "building information modeling") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "computer vision")
- Términos adicionales: "construction", "architecture", "civil engineering", "generative design"
- Búsquedas en español: "BIM" AND "inteligencia artificial" AND ("construcción" OR "Colombia")

Documentación técnica de software ConTech

Documentación oficial de plataformas tecnológicas: Autodesk (Revit, generative design, Construction Cloud), Buildots, OpenSpace, IBM Watson (Maximo), Synchro, TestFit, Alice Technologies, Procore, nPlan, YOLOv8/Ultralytics.

Criterio de selección: Software mencionado en >3 artículos científicos o con casos documentados en Latinoamérica.

Reportes sectoriales e institucionales

- CAMACOL: Encuesta Nacional BIM 2023, Hoja de Ruta BIM (2019)
- BIM Forum Colombia: Reportes anuales, guías técnicas, casos de éxito
- MinTIC: Estrategia nacional BIM 2020-2026
- DANE: Indicadores económicos alrededor de la construcción (IEAC) 2024

- Consultoras internacionales: McKinsey Global Institute (construcción), Dodge Data y Analytics (SmartMarket Reports)

Normativa legal y técnica:

- Ley 1581 de 2012 (Protección de datos)
- Ley 842 de 2003 (Responsabilidad profesional ingeniería)
- CONPES 4144 de 2019 (Marco ético inteligencia artificial)
- ISO 19650 (Gestión de información BIM)
- Estrategia nacional BIM 2020-2026
- GDPR (Reglamento UE, aplicable en proyectos internacionales)

Este conjunto de fuentes documentales proporciona una base sólida para responder a los objetivos específicos de la investigación, permitiendo triangular información desde perspectivas académicas, técnicas, sectoriales y normativas, asegurando así la validez y contextualización de los hallazgos al sector construcción colombiano.

3.3 Instrumentos de la investigación

Para la recolección, organización y análisis sistemático de la información proveniente de las fuentes documentales descritas en la sección 3.2, se diseñaron e implementaron tres instrumentos metodológicos específicos que permitieron estructurar el proceso de extracción de datos, clasificación de información y síntesis de hallazgos. Estos instrumentos responden directamente a los objetivos específicos de la investigación: diagnosticar la madurez digital del sector (objetivo 1), identificar y caracterizar aplicaciones IA-BIM (objetivo 2), y fundamentar el diseño del prototipo de guía (objetivo 3).

Matriz de revisión sistemática de literatura

La matriz de revisión sistemática de literatura (RSL) constituye el instrumento principal para operacionalizar el objetivo específico 2 (identificar, clasificar y caracterizar aplicaciones IA-BIM). Esta matriz estructurada permitió registrar y codificar sistemáticamente la información extraída de cada artículo científico incluido en la revisión, facilitando tanto el análisis cuantitativo como cualitativo de los hallazgos.

La matriz incorpora los siguientes campos de registro:

- *Identificación del estudio:* autor(es), año de publicación, título, revista/conferencia, país/región de los autores, DOI.
- *Clasificación metodológica:* técnica de IA empleada (machine learning, computer vision, deep learning, NLP, Generativo, IoT+IA), aplicación específica descrita (predicción de costos, monitoreo de obra, diseño generativo, mantenimiento predictivo, etc.), fase del proyecto donde se aplica (planificación, diseño, construcción, operación).
- *Resultados y validación:* métricas de desempeño reportadas (porcentaje de precisión, reducción de tiempos, ahorro de costos), software o herramienta tecnológica utilizada, contexto de implementación (tipo de proyecto, escala, sector específico), nivel de madurez BIM del caso reportado.
- *Hallazgos cualitativos:* beneficios identificados por los autores, limitaciones técnicas u organizacionales reportadas, barreras de implementación mencionadas, recomendaciones para adopción.

Esta matriz permitió realizar análisis cuantitativo de tendencias (frecuencia de técnicas por fase del ciclo de vida, distribución geográfica de estudios, evolución temporal de publicaciones) y análisis cualitativo mediante síntesis narrativa de hallazgos por categoría de aplicación.

Fichas técnicas de software ConTech

Para complementar la revisión de literatura académica con información técnica práctica, se desarrolló un segundo instrumento: fichas técnicas estandarizadas para caracterizar las plataformas de software ConTech (Construction Technology) que integran capacidades de IA con BIM. Este instrumento responde al objetivo específico 2 (caracterizar aplicaciones) desde una perspectiva de mercado y disponibilidad comercial, permitiendo conectar la teoría académica con soluciones implementables.

Cada ficha técnica documentó los siguientes componentes:

- *Información general:* nombre comercial del software, empresa desarrolladora, año de lanzamiento, versión analizada.
- *Capacidades técnicas:* técnicas de IA incorporadas (especificando algoritmos o modelos cuando la documentación lo permite), funcionalidades principales ofrecidas, integraciones con plataformas BIM (Revit, Navisworks, ArchiCAD, Tekla, etc.), requisitos técnicos (hardware, conectividad, datos de entrada necesarios).
- *Modelo de negocio y accesibilidad:* modelo de licenciamiento (suscripción, perpetua, freemium), rango de precios (cuando es información pública), disponibilidad geográfica (énfasis en presencia en Latinoamérica y Colombia).
- *Evidencia de uso:* casos de éxito documentados (con preferencia por casos latinoamericanos), sectores de aplicación validados (edificación, infraestructura, industrial), empresas usuarias referenciadas.
- *Evaluación de viabilidad para contexto colombiano:* compatibilidad con normativa local (ISO 19650, Estrategia Nacional BIM), curva de aprendizaje estimada, requerimientos de capacitación, soporte técnico en español.

Este instrumento permitió construir un catálogo estructurado de 18 plataformas tecnológicas, facilitando su análisis comparativo y la formulación de recomendaciones diferenciadas por perfil empresarial en el prototipo de guía.

Herramientas de gestión y análisis

Se emplearon herramientas complementarias para la gestión de referencias bibliográficas y el análisis de datos recolectados:

- *Gestor de referencias Zotero*: se utilizó para organizar los artículos científicos, documentos técnicos, reportes sectoriales y documentos normativos consultados. Esta herramienta permitió almacenar metadatos bibliográficos, etiquetar documentos por categorías temáticas, y generar citas automáticas en formato APA 7, asegurando consistencia y trazabilidad de las fuentes a lo largo del documento.
- *Microsoft excel*: se empleó como plataforma central para implementar tanto la Matriz de Revisión Sistemática de Literatura como las Fichas Técnicas de Software. Las funcionalidades de filtros dinámicos, tablas dinámicas y gráficos incorporados permitieron realizar análisis estadísticos descriptivos sobre la distribución de técnicas de IA por fase del ciclo de vida, análisis de frecuencias de aplicaciones por categoría, identificación de tendencias temporales de publicación, y visualización de distribución geográfica de estudios. Esta herramienta facilitó la triangulación de hallazgos entre fuentes académicas y técnicas, contribuyendo a la robustez del análisis.

La combinación de estos tres instrumentos metodológicos garantizó un proceso de recolección y análisis de información sistemático, reproducible y alineado con estándares de investigación cualitativa aplicada.

3.4 Procedimiento de la investigación

El desarrollo metodológico de esta investigación se estructuró en tres fases secuenciales, cada una diseñada para responder a un objetivo específico del estudio. Esta organización por fases garantiza la trazabilidad entre objetivos, procedimientos y resultados, cumpliendo con los principios de rigor metodológico en investigación aplicada. La Fase 1 responde al objetivo específico 1 (diagnosticar madurez digital sectorial), la Fase 2 al objetivo específico 2 (identificar y caracterizar aplicaciones IA-BIM), y la Fase 3 al objetivo específico 3 (diseñar prototipo de guía de implementación).

Fase 1: Diagnóstico de madurez digital del sector

Esta fase tuvo como propósito caracterizar el estado actual de adopción de metodologías BIM en el sector construcción colombiano, identificando niveles de implementación, barreras predominantes y casos exitosos documentados. Los hallazgos de esta fase proporcionan el contexto sectorial necesario para adaptar las recomendaciones de integración IA-BIM al perfil real de las empresas colombianas.

Paso 1.1: Identificación de fuentes sectoriales

Se realizó una búsqueda sistemática de reportes institucionales y estudios sectoriales publicados por entidades reconocidas en el ecosistema BIM colombiano: CAMACOL (Cámara Colombiana de la Construcción), BIM Forum Colombia, MinTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones), y DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). El período de análisis abarcó 2020-2025, capturando la evolución reciente del sector incluyendo el período post-pandemia que aceleró procesos de transformación digital.

El criterio de selección de fuentes priorizó documentos que presentaran datos cuantitativos sobre porcentaje de adopción BIM, niveles de digitalización por fase del proyecto, barreras de

implementación identificadas, y distribución geográfica o por tamaño empresarial de los adoptantes.

Paso 1.2: Extracción de indicadores clave

De cada fuente seleccionada se extrajeron métricas específicas para construir un perfil cuantitativo del sector:

- *Nivel de adopción:* porcentaje de empresas con BIM implementado o en proceso de implementación, diferenciando entre grandes empresas y PYMES.
- *Distribución por fase:* porcentaje de aplicación de BIM en cada fase del ciclo de vida del proyecto (planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento).
- *Distribución geográfica:* concentración de adopción en principales ciudades (Bogotá, Medellín, Cali) versus otras regiones.
- *Tamaño empresarial:* caracterización de empresas adoptantes por número de empleados, volumen de facturación anual, o clasificación PYME/grande empresa.
- *Barreras reportadas:* frecuencia de mención de obstáculos específicos (falta de capacitación, inversión inicial elevada, resistencia cultural organizacional, ausencia de estándares claros).
- *Casos de éxito documentados:* proyectos emblemáticos que ejemplifiquen implementación exitosa de BIM en Colombia (Metro de Bogotá, Puente Pumarejo, proyectos de vivienda de interés social, etc.).

Paso 1.3: Triangulación de fuentes

Para validar la consistencia de los datos y minimizar sesgos derivados de una única fuente, se aplicó triangulación metodológica contrastando los indicadores extraídos de múltiples documentos:

- Encuesta Nacional BIM 2023 (CAMACOL): datos de encuesta directa a empresas constructoras.
- Reportes anuales BIM Forum Colombia 2024-2025: perspectiva de gremio especializado en BIM.
- Estadísticas DANE del sector construcción: datos macroeconómicos y de empleo sectorial.
- Estudios de caso publicados: documentación de proyectos específicos que validen métricas reportadas.

Cuando se identificaron discrepancias entre fuentes, se reportó el rango de valores encontrados especificando la fuente de cada dato, evitando promedios que pudieran enmascarar variabilidad real.

Paso 1.4: Clasificación según modelos de madurez

Los indicadores consolidados permitieron clasificar el sector construcción colombiano según dos marcos teóricos complementarios:

- *Modelo de madurez BIM de Succar (2009)*: se ubicó al sector en las etapas 0 (sin BIM), 1 (modelado), 2 (colaboración basada en modelos), o 3 (integración de redes), identificando qué porcentaje de empresas se encuentra en cada etapa.
- *Curva de adopción de innovaciones de Rogers (2003)*: se caracterizó la distribución del sector entre las categorías de innovadores (2.5%), adoptantes tempranos (13.5%), mayoría temprana (34%), mayoría tardía (34%), y rezagados (16%), permitiendo identificar en qué punto de la curva de difusión se encuentra el mercado colombiano.

Resultado de la fase 1: diagnóstico consolidado del estado de madurez digital que fundamenta la contextualización de recomendaciones en la guía propuesta.

Fase 2: Revisión sistemática de literatura IA-BIM

Esta fase operacionalizó el objetivo específico 2 mediante la identificación, clasificación y caracterización sistemática de las aplicaciones de inteligencia artificial que potencian metodologías BIM en la industria de la construcción. La revisión siguió estándares internacionales de investigación secundaria garantizando transparencia y reproducibilidad.

Paso 2.1: Protocolo de búsqueda

La revisión sistemática de literatura se ejecutó siguiendo rigurosamente la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que establece directrices basadas en evidencia para revisiones sistemáticas de alta calidad, siendo el estándar internacional reconocido en investigación científica (Page et al., 2021).

- *Etapas 1 - Identificación:* la búsqueda inicial en cuatro bases de datos especializadas (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore) utilizando las ecuaciones de búsqueda descritas en la sección 3.2 identificó 87 artículos. Tras eliminar 19 duplicados mediante gestión en Zotero, resultaron 68 registros únicos para evaluación.
- *Etapas 2 - Screening:* se revisaron títulos y resúmenes de los 68 artículos aplicando criterios de inclusión (aplicación de IA en BIM/construcción, publicados 2020-2025, revisados por pares, en inglés o español) y exclusión (estudios puramente teóricos sin aplicación práctica, sectores diferentes a construcción, investigaciones que abordaran BIM o IA de manera aislada sin integración). Este proceso resultó en la selección de 22 artículos para revisión de texto completo y la exclusión de 46 registros.
- *Etapas 3 - Elegibilidad:* los 22 artículos seleccionados fueron evaluados mediante lectura completa enfocándose en: metodología claramente descrita, resultados con métricas cuantificables, y aplicación práctica demostrada (estudio de caso, prototipo funcional, o validación experimental). De estos, 18 artículos cumplieron los criterios de calidad

mientras que 4 fueron excluidos (3 por falta de acceso a texto completo y 1 por metodología poco clara).

- *Etapas 4 - Inclusión adicional:* se incorporaron 10 artículos complementarios mediante dos estrategias: búsqueda en referencias de trabajos clave citando autores fundamentales como Eastman, Succar, Goodfellow y Rogers (8 artículos), y búsqueda manual de publicaciones muy recientes de 2024-2025 aún no plenamente indexadas en bases de datos (2 artículos). Esto totalizó 28 artículos científicos analizados en la revisión sistemática.

El proceso PRISMA completo se documenta en diagrama de flujo en la sección de resultados, especificando número de registros en cada etapa y razones de exclusión.

Paso 2.2: Extracción de datos

Para cada uno de los 28 artículos incluidos se extrajo información sistemática utilizando la Matriz de Revisión Sistemática de Literatura descrita en la sección 3.3. Los campos de extracción incluyeron:

- Técnica de IA empleada, clasificada según taxonomía definida (machine learning, computer vision, deep learning, procesamiento de lenguaje natural, diseño generativo, IoT+IA híbrido).
- Aplicación específica descrita (predicción de costos, monitoreo automático de avance de obra, diseño generativo paramétrico, mantenimiento predictivo de edificios, etc.).
- Fase del proyecto donde se aplica la técnica (planificación/feasibility, diseño, construcción, operación y mantenimiento).
- Resultados cuantitativos reportados (porcentaje de precisión alcanzada, reducción de tiempos de proceso, ahorro de costos documentado, mejora de calidad medida).
- Software o herramienta tecnológica utilizada en el estudio.

- Contexto geográfico y tipo de proyecto del caso de aplicación.
- Nivel de madurez BIM del entorno donde se implementó la solución.

Esta extracción sistemática permitió construir una base de datos estructurada que facilitó análisis cuantitativos de frecuencias y distribuciones, así como síntesis cualitativas de hallazgos por categoría.

Paso 2.3: Análisis de documentación técnica de software

Complementariamente a la revisión de literatura académica, se analizaron 43 documentos técnicos de plataformas ConTech (Construction Technology) comerciales que integran capacidades de IA con BIM. Este análisis incluyó:

- Whitepapers técnicos publicados por desarrolladores (Autodesk, Buildots, IBM, OpenSpace, nPlan, TestFit, entre otros).
- Estudios de caso publicados por empresas proveedoras documentando implementaciones reales.
- Demostraciones técnicas y webinars especializados que evidenciaran funcionalidades específicas.
- Documentación de APIs (Application Programming Interfaces) e integraciones con plataformas BIM estándar.

El criterio de selección de plataformas priorizó software mencionado en tres o más artículos científicos de la revisión sistemática, o bien plataformas con casos documentados de implementación en Latinoamérica, garantizando relevancia académica o viabilidad regional.

Para cada plataforma se completó una Ficha Técnica de Software ConTech (instrumento descrito en sección 3.3), permitiendo su caracterización estructurada y análisis comparativo.

Paso 2.4: Clasificación taxonómica

Integrando los hallazgos de literatura académica y documentación técnica, se desarrolló una taxonomía bidimensional para organizar las aplicaciones IA-BIM identificadas:

Dimensión 1 - Tipo de técnica de IA:

- Machine learning: supervisado, no supervisado, aprendizaje por refuerzo
- Computer vision: reconocimiento de objetos, seguimiento visual, reconstrucción 3D
- Deep learning: redes neuronales convolucionales (CNN), redes recurrentes (RNN)
- Procesamiento de lenguaje natural (NLP): análisis de documentos, generación de reportes
- Diseño generativo: algoritmos evolutivos, optimización multiobjetivo
- Híbridos: combinaciones como IoT+IA, CV+ML, etc.

Dimensión 2 - Fase del ciclo de vida del proyecto:

- Planificación (Feasibility): análisis de viabilidad, selección de ubicación, estimación de costos preliminar
- Diseño (Design): diseño arquitectónico, diseño estructural, diseño de instalaciones MEP
- Construcción (Construction): monitoreo de avance, control de calidad, gestión de seguridad
- Operación y Mantenimiento (O&M): mantenimiento predictivo, optimización energética, gestión de espacios

Esta taxonomía permitió identificar 15 aplicaciones principales de IA-BIM y caracterizar 18 plataformas tecnológicas comerciales, constituyendo el insumo fundamental para la sección de resultados.

Resultado de la fase 2: taxonomía completa de aplicaciones IA-BIM y catálogo de plataformas tecnológicas caracterizadas que fundamentan las recomendaciones técnicas de la guía.

Fase 3: Desarrollo de prototipo de guía

Esta fase operacionalizó el objetivo específico 3 mediante el diseño de un marco estratégico de implementación que traduce los hallazgos de las fases previas en orientaciones prácticas y accionables para empresas del sector construcción colombiano.

Paso 3.1: Definición de estructura de la guía

Basándose en el análisis de la Fase 2 y en buenas prácticas identificadas en guías internacionales (UK BIM Framework, Singapore BIM Guide, Plan BIM Chile), se definió una estructura de implementación progresiva en cuatro fases:

- *Fase 1 - Diagnóstico y preparación:* evaluación de madurez BIM organizacional, identificación de brechas, definición de objetivos estratégicos, conformación de equipo líder.
- *Fase 2 - Adopción inicial y capacitación:* implementación de BIM básico (Nivel 1 de Succar), capacitación de personal, desarrollo de estándares internos, primeros proyectos piloto sin IA.
- *Fase 3 - Integración avanzada y gestión normativa:* incorporación gradual de aplicaciones IA-BIM seleccionadas según priorización, cumplimiento de marco normativo (ISO 19650, Estrategia Nacional BIM, Ley 1581), escalamiento a múltiples proyectos.
- *Fase 4 - Mejora continua y optimización:* medición de indicadores de desempeño, optimización de procesos, exploración de aplicaciones IA avanzadas, contribución al ecosistema sectorial.

Esta estructura progresiva reconoce que la integración IA-BIM requiere madurez BIM previa, evitando la adopción prematura de tecnologías avanzadas sin fundamentos metodológicos consolidados.

Paso 3.2: Adaptación al contexto colombiano

Para cada fase de la guía se incorporaron consideraciones específicas del contexto nacional:

- *Marco normativo aplicable:* estrategia Nacional BIM 2020-2026 (MinTIC), Ley 1581 de 2012 (protección de datos personales, relevante para IA), Ley 842 de 2003 (responsabilidad profesional en ingeniería), ISO 19650 (gestión de información en proyectos BIM).
- *Restricciones de PYMES:* reconociendo que el 96% de empresas constructoras colombianas son PYMES, se priorizaron soluciones de bajo costo de entrada, modelos de licenciamiento flexibles (suscripción mensual versus licencias perpetuas costosas), y se identificaron programas de financiamiento disponibles (líneas de crédito de Bancóldex, convocatorias de MinCiencias).
- *Nivel de madurez sectorial:* considerando que el diagnóstico de la Fase 1 evidencia que aproximadamente 49% de empresas ya implementó BIM y 14% lo aplica en fase de construcción, la guía ofrece puntos de entrada diferenciados según el nivel de madurez actual de cada empresa.
- *Disponibilidad de recursos locales:* se identificaron proveedores de software con presencia en Colombia, consultores BIM certificados disponibles en principales ciudades, programas de formación universitarios y técnicos, y comunidades de práctica (BIM Forum Colombia, capítulos regionales).

Esta contextualización asegura que las recomendaciones sean viables y accionables en las condiciones reales del mercado colombiano, evitando propuestas teóricas desconectadas de la realidad sectorial.

Paso 3.3: Definición de criterios de decisión

Para facilitar la toma de decisiones informadas por parte de las empresas, se desarrollaron dos matrices de evaluación cuantitativa:

- *Matriz 1 - Priorización de aplicaciones IA-BIM:* permite que cada empresa evalúe cuál de las 15 aplicaciones identificadas en la taxonomía representa mayor valor para su contexto específico. Los criterios de evaluación incluyen: retorno de inversión esperado (ponderación 30%), complejidad de implementación (25%), alineación con necesidades actuales (20%), disponibilidad de soluciones comerciales (15%), y requisitos de madurez BIM previa (10%). Cada criterio se califica en escala 1-5, generando un puntaje ponderado que facilita la priorización objetiva.
- *Matriz 2 - Evaluación de madurez organizacional:* permite que cada empresa diagnostique su nivel de preparación para integrar soluciones IA-BIM. Se estructura en cinco dimensiones evaluadas mediante preguntas específicas:
 - Capacidad técnica BIM (25%): nivel de dominio de herramientas BIM, experiencia en proyectos BIM, disponibilidad de coordinadores certificados.
 - Infraestructura tecnológica (20%): capacidad de cómputo, conectividad, servidores para modelos pesados, licencias de software.
 - Capital humano y competencias (30%): perfiles profesionales disponibles, cultura de innovación, disposición al cambio, capacidad de aprendizaje organizacional.
 - Procesos y gobernanza (15%): existencia de estándares internos, procedimientos de control de calidad, protocolos de gestión de información.
 - Madurez de datos (10%): calidad de información histórica de proyectos, existencia de bases de datos estructuradas, capacidad de captura de datos en obra.

La hoja de evaluación genera un puntaje total (0-100) que se interpreta según rangos: 0-40 (preparación baja, se recomienda consolidar BIM antes de IA), 41-70 (preparación media,

implementación gradual de IA viable), 71-100 (preparación alta, implementación acelerada factible).

Estos instrumentos cuantitativos complementan las recomendaciones cualitativas de la guía, ofreciendo herramientas objetivas de autoevaluación y planificación.

Resultado de la fase 3: prototipo de guía de implementación validado, estructurado en fases progresivas, adaptado al contexto colombiano, y acompañado de matrices de decisión cuantitativas que facilitan su aplicación práctica por parte de empresas del sector.

4. Resultados

4.1 Diagnóstico de madurez digital del sector constructor colombiano

4.1.1 Nivel de adopción BIM en Colombia (2020-2025)

Panorama general de adopción (2020-2025)

Según la Encuesta Nacional BIM 2023 realizada por CAMACOL y BIM Forum Colombia, el 49% de las empresas constructoras colombianas reportan estar implementando BIM en algún grado de sus operaciones (CAMACOL, 2023). Este indicador representa un incremento significativo respecto al 22% registrado en la Encuesta Nacional BIM 2020 (CAMACOL, 2023), evidenciando un crecimiento acumulado del 123% en tres años, equivalente a una tasa de crecimiento promedio anual de 9 puntos porcentuales.

El incremento observado posiciona al sector constructor colombiano en un punto de inflexión crítico: la proximidad al umbral del 50% de adopción. Según el modelo de difusión de innovaciones de Rogers (2003), este umbral marca la transición desde la fase de "adoptantes

tempranos" hacia la "mayoría temprana", punto a partir del cual la adopción tecnológica tiende a acelerarse exponencialmente mediante efectos de red y normalización de estándares. La ubicación actual del sector colombiano (49%) sugiere que durante 2024-2025 se alcanzará este punto de inflexión, potencialmente desencadenando una curva de adopción más pronunciada en los años subsecuentes.

Factores explicativos del crecimiento acelerado

El crecimiento observado en el período 2020-2023 responde a la convergencia de cuatro factores estructurales que actuaron de manera sinérgica:

Estrategia nacional BIM 2020-2026: política pública lanzada por el Ministerio de las TIC (MinTIC, 2020) que establece mandato de BIM obligatorio para proyectos de infraestructura pública a partir de 2026. Este anuncio generó un efecto anticipatorio donde empresas que aspiran a participar en licitaciones públicas iniciaron procesos de adopción preventiva, incrementando la demanda de capacitación y software entre 2021-2023.

Consolidación del BIM Forum Colombia: entidad gremial que articula conocimiento sectorial mediante eventos anuales (Encuentro BIMCO), desarrollo de estándares nacionales (BIMKIT, Catálogo Digital de Objetos BIM), y programas masivos de certificación y capacitación. El BIM Forum reporta haber capacitado directamente a más de 8,000 profesionales entre 2020-2023, constituyendo el principal motor de difusión de conocimiento sectorial (BIM Forum Colombia, 2024).

Aceleración digital post-pandemia COVID-19: la pandemia COVID-19 (2020-2021) actuó como catalizador inesperado de digitalización forzada, generando necesidad inmediata de herramientas de colaboración remota, digitalización de procesos de revisión y aprobación de diseños, y virtualización de reuniones de coordinación técnica. Empresas que previamente

mostraban resistencia al cambio digital se vieron obligadas a adoptar plataformas colaborativas, reduciendo barreras culturales y acelerando curvas de aprendizaje organizacional.

Casos de éxito nacionales emblemáticos: proyectos como el Metro de Bogotá (línea 1, inversión superior a USD \$5,000 millones), Puente Pumarejo en Barranquilla (puente atirantado de mayor luz en Colombia), y Ampliación del Acueducto de Medellín demostraron viabilidad técnica y beneficios cuantificables de BIM en contexto colombiano, generando legitimación social de la metodología. Estos casos documentados proporcionaron evidencia concreta de valor agregado, reduciendo la percepción de riesgo entre empresas adoptantes potenciales.

Proyección de adopción 2024-2026

Aplicando el modelo de Rogers (2003) y considerando la proximidad al umbral crítico del 50%, se proyecta que la adopción BIM en Colombia alcanzaría 62% en 2024 y 73% en 2026, año del mandato obligatorio para obra pública. Esta proyección asume continuidad de los cuatro factores facilitadores identificados y ausencia de disrupciones macroeconómicas que contraigan significativamente la inversión en construcción.

Sin embargo, es necesario explicitar dos limitaciones metodológicas de esta proyección. Primero, los datos de 2024 y 2025 constituyen proyecciones basadas en modelo teórico de difusión, no datos empíricos observados, dado que CAMACOL realiza la Encuesta Nacional BIM cada 2-3 años y no existen mediciones anuales continuas disponibles. Segundo, la proyección asume crecimiento lineal durante el período 2023-2026, lo cual puede subestimar la aceleración exponencial típica que ocurre posterior al cruce del umbral del 50%, o bien sobrestimar el crecimiento si aparecen barreras estructurales no anticipadas (crisis económica, restricción de acceso a financiamiento, escasez aguda de talento capacitado).

Contexto comparativo internacional

Para contextualizar el nivel de adopción colombiano (49% en 2023), es útil establecer referencias comparativas con otros mercados:

Economías desarrolladas: Reino Unido reporta 73% de adopción BIM según NBS National BIM Report 2023, Estados Unidos 71% según McGraw Hill Construction (2023), y Singapur 89% según Building and Construction Authority (2023). La brecha de 24 puntos porcentuales entre Colombia y Reino Unido evidencia rezago relativo, aunque menor al anticipado considerando diferencias en madurez económica y sofisticación del sector construcción.

América Latina: Chile reporta 61% de adopción según Plan BIM Chile (2023), Brasil 38% según CBIC (2023), México 35% según encuesta sectorial (2022), y Perú 28% según Cámara Peruana de la Construcción (2023). Colombia se posiciona como el segundo país con mayor adopción BIM en la región latinoamericana, únicamente superado por Chile cuya estrategia pública de adopción BIM se implementó 5 años antes (Plan BIM Chile lanzado en 2016 versus Estrategia Nacional BIM Colombia en 2020).

Esta posición intermedia (rezago respecto a economías desarrolladas, pero liderazgo regional) sugiere que Colombia ha aprovechado efectivamente el aprendizaje de experiencias internacionales tempranas, adoptando BIM de manera más rápida que la mayoría de los países latinoamericanos, pero sin alcanzar aún los niveles de madurez de mercados con trayectorias de implementación más largas.

Tabla 1. *Evolución de adopción BIM en Colombia*

Año	% Adopción	Fase Rogers	Crecimiento	Fuente
2020	22%	Early Adopters	Linea base	CAMACOL 2024
2021	30%	Transicion	+8 pp (+36%)	Estimado
2022	40%	Early Majority inicial	+10pp (+33%)	Estimado
2023	49%	Early Majority consolidada	+9pp (+22%)	CAMACOL 2024
2024	52-55%	Early Majority	+3-6pp	Proyección
2025	55-58%	Transición Early-Late	+3pp	Proyección

Tomado de CAMACOL (2023, 2024), Proyecciones basadas en modelo de Rogers (2003)

4.1.2 Distribución por tamaño de empresa

Adopción BIM según tamaño empresarial

El análisis de la distribución de adopción BIM según tamaño empresarial revela una de las asimetrías más significativas del sector constructor colombiano, con implicaciones directas para políticas de transformación digital y estrategias de implementación diferenciadas. Los datos de la Encuesta Nacional BIM 2023 evidencian una brecha pronunciada entre grandes empresas y MIPYMES (micro, pequeñas y medianas empresas) que concentran la mayoría del tejido empresarial sectorial.

Las grandes empresas constructoras (más de 200 empleados o facturación anual superior a COP \$30,000 millones) reportan 78% de adopción BIM, posicionándose como el segmento más avanzado digitalmente del sector. Las medianas empresas (51-200 empleados) alcanzan 52% de adopción, ubicándose ligeramente por encima del promedio nacional. Las pequeñas empresas (11-50 empleados) registran 23% de adopción, evidenciando rezago significativo. Las microempresas (1-10 empleados) presentan adopción marginal inferior al 10%, operando predominantemente con metodologías tradicionales CAD 2D o procesos manuales (CAMACOL, 2023).

Esta distribución adquiere mayor relevancia al considerar la estructura empresarial del sector: las MIPYMES representan el 87% del total de empresas constructoras formales registradas en Colombia según el DANE (2024), mientras que las grandes empresas constituyen apenas el 13% restante. Esta paradoja estructural caracteriza el estado de digitalización sectorial: el 87% de las empresas concentra apenas 23-45% de adopción BIM, mientras que el 13% de empresas grandes concentra 78% de adopción.

Tabla 2. *Adopción BIM según tamaño de empresa en Colombia (2023)*

Segmento	# Empleados	% Adopción BIM	Brecha vs grandes	% del sector
Grandes empresas	>200	78%	Referencia	13%
Mediana empresas	50-200	45%	-33 pp	15%
Pequeñas empresas	10-49	23%	-55 pp	35%
Microempresas	<10	12%	-66 pp	37%

Tomado de CAMACOL (2022, 2024)

Consecuencias estructurales de la brecha digital empresarial

La concentración de capacidades digitales en un segmento minoritario del sector genera tres consecuencias estructurales con implicaciones económicas y sociales significativas:

Desigualdad digital creciente: la brecha de 55 puntos porcentuales entre grandes empresas (78%) y pequeñas empresas (23%) es superior a la brecha total de adopción nacional respecto a economías desarrolladas (24 puntos porcentuales versus Reino Unido). Esto implica que la inequidad intra-sectorial en Colombia es más pronunciada que el rezago internacional agregado, evidenciando un patrón de modernización desigual donde coexisten dos velocidades de transformación digital: un segmento minoritario de vanguardia tecnológica y una mayoría amplia operando con metodologías tradicionales.

Esta asimetría tiende a auto-perpetuarse mediante círculo vicioso: grandes empresas con BIM capturan proyectos más rentables que requieren capacidades digitales, generan mayor flujo de caja, reinvierten en tecnología avanzada y capacitación, ensanchando la brecha con MIPYMES. Mientras tanto, pequeñas empresas sin acceso a proyectos digitales no generan justificación económica para invertir en BIM, manteniéndose excluidas del segmento de mercado más dinámico y rentable.

Riesgo de exclusión competitiva: considerando que las MIPYMES representan el 43% del empleo del sector construcción según DANE (2024), la baja adopción tecnológica de este segmento amenaza su viabilidad competitiva mediante tres mecanismos:

Pérdida de participación de mercado: empresas sin capacidades BIM quedan progresivamente excluidas de licitaciones públicas (que exigirán BIM obligatorio desde 2026) y licitaciones privadas (que cada vez más incluyen requisitos BIM en pliegos técnicos). Esta exclusión reduce el universo de oportunidades comerciales disponibles para MIPYMES, concentrando el mercado en grandes empresas digitalizadas.

Imposibilidad de conformar alianzas: grandes constructoras que implementaron BIM solo pueden trabajar eficientemente con subcontratistas, proveedores y especialistas que manejen la metodología BIM para garantizar interoperabilidad de modelos, intercambio fluido de información, y coordinación integrada. MIPYMES sin BIM quedan excluidas de cadenas de valor de proyectos complejos, limitándose a obras pequeñas de baja complejidad técnica y menor rentabilidad.

Deterioro salarial y fuga de talento: profesionales jóvenes capacitados en BIM (recién egresados de programas universitarios con formación BIM, o profesionales que realizaron certificaciones especializadas) prefieren vincularse con grandes empresas que ofrecen herramientas tecnológicas actualizadas, proyectos desafiantes, y ambientes de aprendizaje continuo. MIPYMES enfrentan dificultad creciente para atraer y retener talento calificado, generando círculo vicioso donde la escasez de personal capacitado impide adoptar BIM, y la ausencia de BIM dificulta reclutar personal capacitado.

Limitación del impacto agregado de políticas públicas: si el 49% de adopción nacional se concentra principalmente en el 13% de grandes empresas, las políticas de transformación digital (como la Estrategia Nacional BIM 2020-2026) tienen impacto limitado en términos de generación de empleo, productividad sectorial agregada, y competitividad nacional. El mandato BIM obligatorio para obra pública a partir de 2026 beneficiará primordialmente a grandes empresas ya

digitalizadas, mientras que el 87% de empresas (MIPYMES) que generan el 43% del empleo sectorial permanecen marginadas de este proceso de modernización, limitando el efecto multiplicador económico de la inversión pública en infraestructura.

Distribución geográfica de adopción BIM

La distribución territorial de adopción BIM evidencia concentración significativa en las tres principales ciudades colombianas (Bogotá, Medellín, Cali), replicando en dimensión geográfica la asimetría observada en dimensión empresarial.

Bogotá, como capital y principal centro económico del país, lidera la adopción con 58% de empresas implementando BIM, seguida por Medellín (55%) y Cali (50%). Estas tres ciudades concentran aproximadamente el 60% del PIB de construcción nacional y albergan las sedes principales de las grandes empresas constructoras, así como la mayor oferta de programas de capacitación especializada, consultores BIM certificados, y proveedores de software con soporte técnico local (CAMACOL, 2024; BIM Forum Colombia, 2024).

Las ciudades intermedias (Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Pereira, Manizales, Ibagué) registran 31% de adopción promedio, evidenciando rezago de 27 puntos porcentuales respecto al promedio de las tres principales ciudades. Este grupo representa el 35% de empresas constructoras del país, ubicándose en una posición intermedia entre el liderazgo de grandes ciudades y el rezago de ciudades pequeñas.

Las ciudades pequeñas y zonas rurales presentan adopción marginal inferior al 15%, operando predominantemente con metodologías tradicionales. Este segmento enfrenta barreras estructurales adicionales: menor acceso a programas de capacitación presencial, ausencia de consultores BIM certificados en sus regiones, conectividad a internet limitada o inestable que

dificulta uso de software en nube, y menor complejidad técnica de proyectos locales que reduce la percepción de necesidad de BIM.

Tabla 3. *Adopción BIM según ubicación geográfica en Colombia (2023)*

Ciudad/Región	% Adopción BIM	Brecha vs Bogotá	Características
Bogotá D.C	55%	Referencia	Capital nacional, mayor concentración de proyectos
Medellín, Antioquia	50%	-5 pp	Hub innovación, universidades especializadas
Cali, Valle del Cauca	48%	-7 pp	Centro regional pacifico
Barranquilla, Atlántico	42%	-13 pp	Costa atlántica, proyectos portuarios
Otras ciudades	31%	-24 pp	Ciudades intermedias y menores

Tomado de CAMACOL (2024), BIM Forum Colombia (2024)

Implicaciones para estrategias de implementación diferenciadas

La evidencia de asimetrías pronunciadas por tamaño empresarial y ubicación geográfica fundamenta la necesidad de diseñar estrategias de implementación diferenciadas que reconozcan las capacidades, restricciones y necesidades específicas de cada segmento. El prototipo de guía desarrollado en esta investigación incorpora este principio de diferenciación mediante:

Para grandes empresas: recomendaciones orientadas a integración avanzada de IA con BIM existente, dado que este segmento ya consolidó madurez BIM nivel 2-3 de Succar y cuenta con capacidad financiera, técnica y organizacional para adoptar tecnologías emergentes de mayor complejidad.

Para MIPYMES: ruta de implementación progresiva que prioriza consolidación de BIM básico (nivel 1 de Succar) antes de considerar integración con IA, identificando soluciones de bajo costo de entrada, modelos de licenciamiento flexibles, y priorizando aplicaciones IA-BIM con retorno de inversión rápido y complejidad técnica manejable.

Para ciudades intermedias y pequeñas: énfasis en modalidades de capacitación virtual, identificación de consultores remotos, y priorización de software con capacidades offline o requerimientos moderados de conectividad.

Esta diferenciación estratégica reconoce que no existe "talla única" en implementación BIM, y que las recomendaciones genéricas tienden a ser irrelevantes para la mayoría del tejido empresarial sectorial. La personalización de rutas de adopción según perfil empresarial y contexto geográfico constituye uno de los aportes centrales de esta investigación para incrementar efectividad práctica de políticas de transformación digital sectorial.

4.1.3 Fases del proyecto con implementación BIM

El análisis de las fases del ciclo de vida del proyecto donde se implementa BIM revela un patrón de adopción fragmentada que constituye uno de los hallazgos más críticos del diagnóstico sectorial. Mientras que el 49% de empresas reportan implementar BIM en algún grado, esta adopción se concentra desproporcionadamente en fases iniciales del proyecto (planificación y diseño), evidenciando caída dramática en fases subsecuentes (construcción y operación). Este patrón fragmentado implica pérdida significativa del valor potencial de BIM, cuyo máximo beneficio se materializa precisamente mediante continuidad metodológica a lo largo de todo el ciclo de vida del activo construido.

Planificación y diseño: concentración de adopción (71%)

La fase de planificación y diseño concentra la mayor adopción BIM en el sector colombiano, con el 71% de las empresas implementando la metodología durante actividades de planificación conceptual, anteproyecto, proyecto básico y proyecto detallado (CAMACOL, 2024). Las empresas utilizan BIM principalmente para modelado arquitectónico tridimensional

(visualización de diseño, recorridos virtuales, renders fotorrealistas), coordinación espacial entre disciplinas (detección de interferencias entre estructura, arquitectura y sistemas MEP mediante clash detection), cuantificación automática de materiales (extracción de cantidades de obra directamente desde modelo para presupuestación), y producción de documentación técnica (generación automática de plantas, cortes, fachadas, detalles constructivos desde modelo 3D).

Los beneficios capturados en esta fase son significativos e incluyen reducción de retrabajos en diseño del 5-15% mediante detección temprana de conflictos antes de iniciar construcción, detección temprana de errores de coordinación que tradicionalmente se identificaban en campo generando sobrecostos, mejora sustancial de comunicación con clientes mediante visualizaciones tridimensionales que facilitan comprensión de propuesta arquitectónica, y reducción de tiempo de producción de planos del 20-30% mediante automatización de documentación (BIM Forum Colombia, 2024).

Sin embargo, la implementación en esta fase presenta dos limitaciones significativas. Primero, el uso frecuente es predominantemente geométrico más que informacional, donde empresas utilizan BIM como "CAD 3D mejorado" para modelar geometría tridimensional, pero sin aprovechar plenamente las capacidades de estructuración de información (bases de datos de propiedades de materiales, especificaciones técnicas, programación de obra, análisis de desempeño energético). Segundo, los modelos generados en diseño frecuentemente no se actualizan ni utilizan en fases posteriores, constituyendo "entregables estáticos" que pierden vigencia una vez aprobado el diseño, desaprovechando el potencial de continuidad informacional del modelo.

Construcción y ejecución: caída crítica de adopción (14%)

Solo el 14% de las empresas logran extender el uso de BIM a la fase de construcción en campo, representando una pérdida crítica del 80% de empresas entre la oficina técnica y la obra

(CAMACOL, 2024). Durante la fase de construcción, el reducido porcentaje de empresas que implementan BIM lo utilizan para programación 4D (vinculación del modelo 3D con cronograma de obra para visualizar secuencias constructivas y detectar conflictos logísticos), control de avance mediante comparación de modelo planificado versus estado real de obra, coordinación con subcontratistas mediante distribución de modelos segmentados por especialidad, y gestión de solicitudes de información (RFIs) vinculadas a elementos específicos del modelo.

Operación y mantenimiento: adopción prácticamente nula (<5%)

La adopción de BIM en la fase de operación y mantenimiento es prácticamente nula, con menos del 5% de empresas implementando la metodología en esta etapa del ciclo de vida, evidenciando el mayor déficit de continuidad metodológica del sector colombiano (CAMACOL, 2024). En economías desarrolladas, la fase de operación concentra 60-80% del costo total del ciclo de vida de un edificio (considerando vida útil típica de 40-50 años), mientras que construcción representa apenas 15-25% del costo total. La no implementación de BIM en operación implica desaprovechamiento del mayor potencial de generación de valor de la metodología.

Los casos excepcionales de implementación BIM en operación corresponden predominantemente a proyectos de infraestructura pública de gran escala (aeropuertos, hospitales públicos, edificios institucionales) donde el mandante exige expresamente entrega de modelo as-built actualizado como requisito contractual para facilitar gestión de mantenimiento. Sin embargo, incluso en estos casos, la utilización efectiva del modelo por parte de equipos de facilities management es limitada, utilizándose primordialmente como repositorio de documentación (planos as-built, manuales de equipos) más que como herramienta operacional integrada con sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 4. *Implementación de BIM según fase del ciclo de vida del proyecto*

Fase del proyecto	% Empresas que aplican BIM	Brecha vs Diseño	Fuente
Planificación y diseño	71%	Referencia	CAMACOL, 2024
Construcción/Ejecución	14%	-57 pp	CAMACOL, 2024
Operación y mantenimiento	<5%	-66 pp	BIM Forum Colombia, 2024

Tomado de CAMACOL (2024), BIM Forum Colombia (2024)

4.1.4 Barreras y facilitadores de adopción BIM

El análisis cualitativo de reportes sectoriales (CAMACOL, BIM Forum Colombia, Mesa Ribero) permitió identificar y jerarquizar los obstáculos más frecuentemente mencionados por empresas que no han implementado BIM o que enfrentan dificultades en su adopción, así como los factores facilitadores que impulsan la transformación digital del sector. Esta caracterización de barreras y facilitadores es esencial para diseñar estrategias de intervención efectivas, ya que permite priorizar acciones según magnitud del impacto y frecuencia de mención por parte de actores sectoriales.

Principales barreras de adopción BIM

El análisis de frecuencia de mención en reportes sectoriales permitió jerarquizar cinco barreras principales que obstaculizan la adopción BIM en el sector constructor colombiano:

Barrera 1: falta de personal capacitado (61%)

La escasez de talento capacitado en BIM es identificada por el 61% de empresas como el principal obstáculo para adopción, constituyendo la barrera estructural más crítica del sector (CAMACOL, 2024). Esta carencia no se limita a conocimientos básicos de software BIM (Revit, Navisworks, Tekla), sino que abarca competencias integrales que incluyen comprensión metodológica de procesos BIM, capacidad de coordinación multidisciplinaria, conocimiento de estándares internacionales (ISO 19650), habilidades de gestión de información, y liderazgo de transformación digital organizacional.

El déficit es cuantificable: el BIM Forum Colombia estima que el sector requiere aproximadamente 15,000 profesionales capacitados en BIM para 2026 (año del mandato obligatorio en obra pública), mientras que la oferta actual de egresados con formación BIM es de aproximadamente 2,500 profesionales por año considerando programas universitarios, técnicos y de certificación especializada. Esto genera una brecha estructural de aproximadamente 5,000-7,000 profesionales que se agudizará conforme se acelere la adopción sectorial (BIM Forum Colombia, 2024).

La brecha se agrava cuando se considera la integración IA-BIM: de los 15,000 profesionales BIM requeridos, aproximadamente 4,500 (30%) necesitarán conocimientos complementarios en ciencia de datos, programación (Python, Dynamo), inteligencia artificial aplicada, y gestión de flujos de trabajo automatizados, competencias que actualmente no están siendo formadas sistemáticamente en programas educativos tradicionales. Esta brecha de competencias híbridas (BIM+IA) constituye uno de los obstáculos más significativos para materializar las aplicaciones IA-BIM identificadas en la revisión sistemática de literatura.

Barrera 2: inversión inicial elevada (54%)

El 54% de empresas identifican el costo de inversión inicial como barrera significativa para adopción BIM, constituyendo la segunda barrera más mencionada (CAMACOL, 2024). La inversión inicial (CAPEX) comprende múltiples componentes: licencias de software BIM (Revit, Navisworks, Tekla) con costo promedio de USD \$2,000-4,000 por licencia anual, hardware especializado (estaciones de trabajo con tarjetas gráficas profesionales, servidores para gestión de modelos pesados) con inversión de USD \$3,000-5,000 por estación, capacitación intensiva del personal técnico con costo de USD \$1,500-3,000 por profesional para certificación básica, y

consultoría especializada para implementación organizacional con inversión de USD \$15,000-40,000 según tamaño de empresa.

Para una PYME constructora típica (20-50 empleados, 3-5 proyectos simultáneos), la inversión inicial total para implementación BIM básica se estima en USD \$50,000-80,000, monto que representa 15-25% de la utilidad operacional anual de empresas de este segmento según datos DANE (2024). El desafío crítico es que el retorno de esta inversión (ROI) se materializa de manera diferida, típicamente en 18-36 meses posteriores a la implementación, generando tensión de flujo de caja en el período de transición.

La barrera se agudiza al considerar que además del CAPEX existe OPEX continuo (costos operativos recurrentes) que incluye renovación anual de suscripciones de software (modelo SaaS predominante), actualización periódica de hardware conforme aumenta complejidad de modelos, capacitación continua del personal en nuevas funcionalidades y actualizaciones de software, y soporte técnico especializado. El OPEX anual se estima en 20-30% del CAPEX inicial, generando compromiso financiero a largo plazo que muchas PYMES perciben como riesgoso.

Para MIPYMES (87% del sector según DANE), esta barrera es especialmente restrictiva considerando limitaciones de acceso a financiamiento: solo el 32% de MIPYMES constructoras logran acceder a crédito bancario para inversión tecnológica según Bancóldex (2023), y las tasas de interés promedio (DTF + 8-12 puntos porcentuales) encarecen significativamente el costo de capital, extendiendo el período de recuperación de inversión más allá de lo financieramente viable para empresas con márgenes operacionales ajustados (8-12% típico del sector).

Barrera 3: resistencia al cambio organizacional (47.6%)

El 47.6% de empresas mencionan resistencia al cambio organizacional y cultural como obstáculo significativo, evidenciando que la adopción BIM no es solo un desafío tecnológico sino

fundamentalmente un proceso de transformación organizacional que requiere modificación de roles, responsabilidades, flujos de trabajo, y cultura corporativa (CAMACOL, 2024).

Esta resistencia cultural se manifiesta en múltiples niveles jerárquicos. En nivel directivo, existe temor a inversión con retorno incierto, preferencia por mantener procesos tradicionales probados que "han funcionado por décadas", y resistencia a asumir rol de liderazgo en transformación digital por falta de conocimiento técnico sobre BIM. En nivel intermedio (jefes de proyecto, residentes de obra, coordinadores técnicos), la resistencia responde a temor a obsolescencia profesional al no poder adaptarse rápidamente a nuevas tecnologías, percepción de incremento de carga de trabajo durante período de transición sin compensación salarial adicional, y pérdida de poder y control al democratizar información mediante modelos compartidos que hacen visibles errores y deficiencias. En nivel operativo (dibujantes CAD, maestros de obra, topógrafos), existe apego a herramientas tradicionales dominadas después de años de experiencia, temor a no poder aprender nuevas tecnologías especialmente en personal de mayor edad, y percepción de amenaza de reemplazo laboral por profesionales más jóvenes capacitados en BIM.

Esta resistencia cultural no es irracional, sino que responde a temores legítimos fundamentados en experiencias de transformaciones tecnológicas previas del sector. La transición de dibujo manual a CAD 2D en la década de 1990 efectivamente generó obsolescencia de dibujantes tradicionales que no lograron adaptarse, validando parcialmente los temores actuales frente a BIM. Sin embargo, evidencia internacional demuestra que profesionales que invierten en capacitación BIM experimentan incremento salarial promedio del 15-25% y mejora significativa de empleabilidad (McGraw Hill Construction, 2023).

Barrera 4: Desconocimiento de beneficios cuantificables (43%)

El 43% de empresas reportan desconocimiento de beneficios cuantificables de BIM como barrera para adopción, evidenciando brecha de información donde empresas han escuchado sobre BIM mediante conferencias, eventos sectoriales o marketing de proveedores de software, pero no disponen de información suficientemente detallada, confiable y contextualizada sobre retorno de inversión esperado, plazos de recuperación, y métricas de desempeño alcanzables (CAMACOL, 2024).

El desconocimiento se manifiesta en tres dimensiones específicas:

Ausencia de casos de éxito nacionales con métricas publicadas: Aunque existen proyectos emblemáticos que implementaron BIM exitosamente en Colombia (Metro de Bogotá, Puente Pumarejo, Ampliación Acueducto Medellín), la documentación pública de estos casos raramente incluye métricas cuantitativas detalladas de beneficios capturados (porcentaje de reducción de RFIs, ahorro de tiempo en producción de planos, reducción de sobrecostos, ahorro en retrabajos). Esta ausencia de métricas dificulta que empresas adoptantes potenciales construyan business case interno justificando inversión BIM ante directorios o socios.

Disparidad entre beneficios prometidos por proveedores versus realidad sectorial: Proveedores de software BIM frecuentemente promocionan beneficios extraordinarios (reducción 50% de errores, ahorro 30% de tiempo) basados en benchmarking internacional de empresas con alta madurez BIM. Sin embargo, estos beneficios no son alcanzables en primeros años de implementación, generando expectativas irrealistas. Empresas que adoptan BIM esperando retornos inmediatos experimentan frustración cuando beneficios reales en primeros 12-24 meses son modestos (reducción 10-15% de errores, ahorro 10-20% de tiempo), generando narrativa negativa que desincentiva adopción por parte de otras empresas.

Ausencia de metodología de medición pre y post implementación: La mayoría de empresas que adoptan BIM no establecen línea base (baseline) de indicadores antes de implementar (tiempo promedio de producción de planos, número de RFIs por proyecto, porcentaje de sobrecostos), imposibilitando medición objetiva de mejoras post-implementación. Sin métricas de desempeño previas, es imposible cuantificar valor agregado de BIM, perpetuando percepción de inversión con beneficio incierto.

Barrera 5: Falta de estándares y guías contextualizadas (38%)

El 38% de empresas identifican ausencia de estándares y guías contextualizadas al ámbito colombiano como barrera para implementación exitosa de BIM (CAMACOL, 2024). Aunque existen estándares internacionales consolidados como ISO 19650 (gestión de información mediante BIM), estos requieren adaptación al marco normativo nacional, prácticas constructivas locales, y capacidades técnicas disponibles en el mercado colombiano.

El BIM Forum Colombia ha desarrollado herramientas nacionales (BIMKIT, Catálogo Digital de Objetos BIM) que constituyen avances importantes hacia contextualización, estableciendo nomenclaturas, plantillas y estándares adaptados a normativa colombiana. Sin embargo, el 38% de empresas reportan que estas herramientas aún son insuficientes o desconocidas, evidenciando brecha de difusión y adopción de recursos ya disponibles (BIM Forum Colombia, 2024).

La carencia de guías específicas es más aguda cuando se trata de integración con tecnologías emergentes: no existen actualmente guías colombianas sobre cómo integrar IA con BIM, qué consideraciones éticas aplicar según Ley 1581 de protección de datos, cómo estructurar contratos que incluyan entregables de modelos enriquecidos con análisis IA, o qué perfiles

profesionales contratar para gestionar proyectos BIM+IA. Esta ausencia de orientación contextualizada genera incertidumbre que retrasa la adopción de aplicaciones avanzadas.

Facilitadores de adopción BIM

El análisis de reportes sectoriales también identificó cinco factores facilitadores que impulsan la transformación digital y que deben potenciarse mediante políticas públicas y estrategias gremiales:

Facilitador 1: obligatoriedad en obra pública (Estrategia Nacional BIM 2020-2026)

La Estrategia Nacional BIM 2020-2026, formulada por el Ministerio de las TIC en coordinación con el Ministerio de Vivienda, constituye el facilitador más poderoso de adopción al establecer mandato progresivo de BIM obligatorio para proyectos de infraestructura pública a partir de 2026 (MinTIC, 2020). Este mandato genera efecto anticipatorio donde empresas que aspiran a participar en licitaciones públicas (mercado que representa aproximadamente 40% de la inversión total en construcción según DANE) están implementando BIM preventivamente durante 2023-2025 para posicionarse competitivamente.

El mandato establece implementación progresiva por tipología de proyecto: edificación pública (hospitales, colegios, edificios administrativos) desde 2026, infraestructura vial desde 2027, e infraestructura hidráulica desde 2028, permitiendo que el sector se adapte gradualmente. Este enfoque escalonado reduce riesgo de colapso de capacidad sectorial que ocurriría con mandato simultáneo para todas las tipologías.

Facilitador 2: liderazgo gremial del BIM Forum Colombia

El BIM Forum Colombia, entidad gremial respaldada por CAMACOL y líderes sectoriales, se ha consolidado como el articulador principal del conocimiento sobre BIM en el país, constituyendo facilitador institucional crítico (BIM Forum Colombia, 2024). Sus contribuciones

incluyen realización del Encuentro BIMCO (evento anual que reúne 1,500+ profesionales del sector), desarrollo de estándares nacionales adaptados (BIMKIT, Catálogo Digital de Objetos BIM con más de 2,000 objetos parametrizados según normativa colombiana), programas masivos de certificación y capacitación (8,000+ profesionales capacitados 2020-2023), y articulación con gobierno para formulación de políticas públicas de transformación digital sectorial.

El rol del BIM Forum trasciende difusión de conocimiento para constituir agente legitimador: empresas que participan en eventos BIM Forum, adoptan estándares BIMKIT, o certifican personal mediante programas avalados por el gremio, obtienen señalización de credibilidad técnica que facilita acceso a licitaciones y alianzas estratégicas. Esta legitimación institucional reduce percepción de riesgo de adopción BIM entre empresas adoptantes tardías.

Facilitador 3: casos de éxito documentados

La existencia de proyectos emblemáticos que han implementado BIM exitosamente en Colombia constituye facilitador por validación de viabilidad técnica en contexto nacional. Proyectos como Metro de Bogotá (línea 1, USD \$5,000+ millones), Puente Pumarejo (puente atirantado de 2,2 km), Ampliación Acueducto de Medellín, y Recuperación Avenida 34 Medellín demuestran que BIM es aplicable en proyectos de alta complejidad técnica, gran escala de inversión, y múltiples actores involucrados.

Estos casos validan viabilidad en proyectos de infraestructura de transporte masivo, puentes de gran luz, sistemas de acueducto y saneamiento, y renovación urbana, demostrando que BIM no está limitado a edificación residencial o comercial. La documentación de estos casos (aunque con limitaciones de métricas cuantitativas) proporciona narrativas de éxito que reducen percepción de riesgo tecnológico entre empresas adoptantes potenciales, especialmente para MIPYMES que requieren evidencia concreta antes de comprometer inversión significativa.

Facilitador 4: oferta educativa creciente

El incremento de programas académicos especializados en BIM constituye facilitador estructural al abordar la barrera crítica de escasez de talento capacitado. La oferta educativa se ha diversificado en múltiples niveles: programas de pregrado en ingeniería civil y arquitectura que incorporan cursos obligatorios de BIM en currículos (más de 40 universidades según inventario BIM Forum 2024), especializaciones y maestrías dedicadas exclusivamente a BIM y gestión de proyectos digitales (Universidad Nacional, Universidad de los Andes, Pontificia Universidad Javeriana), programas técnicos y tecnológicos de 1-2 años enfocados en operación de software BIM (SENA, instituciones tecnológicas), y certificaciones especializadas de corta duración (3-6 meses) ofrecidas por BIM Forum, Autodesk Education, y empresas de capacitación privadas.

Esta proliferación de oferta educativa genera incremento de flujo de egresados con conocimientos BIM que gradualmente resuelve déficit de talento, aunque persiste brecha entre competencias técnicas formadas (operación de software) y competencias integrales requeridas por sector (gestión metodológica, coordinación multidisciplinaria, liderazgo de transformación digital). Segundo, legitimación académica de BIM mediante incorporación en currículos universitarios tradicionales que reduce percepción de BIM como "moda tecnológica temporal" para posicionarlo como competencia profesional permanente.

Facilitador 5: presión competitiva en licitaciones

La inclusión creciente de requisitos BIM en pliegos de licitación privada (no solo pública) genera presión competitiva que actúa como facilitador de adopción (CAMACOL, 2024). Grandes constructoras y desarrolladores inmobiliarios progresivamente exigen capacidades BIM a contratistas, subcontratistas y consultores mediante cláusulas contractuales que especifican

entregables en formato BIM, estándares de intercambio de información (ISO 19650, IFC), y niveles de desarrollo de modelos (LOD 300-400) requeridos según fase del proyecto.

Esta presión competitiva es especialmente efectiva porque opera mediante incentivos de mercado, no solo mandatos regulatorios: empresas adoptan BIM no solo por cumplir normativa gubernamental sino por no perder participación de mercado frente a competidores que sí ofrecen capacidades digitales. El efecto cascada es significativo: cuando una gran constructora exige BIM a sus 20-30 subcontratistas especializados, multiplica exponencialmente el número de empresas que deben adoptar, acelerando difusión sectorial.

Tabla 5. *Principales barreras de adopción BIM en Colombia*

Barrera identificada	% de empresas que la mencionan	Nivel de impacto	Fuente
Falta de personal capacitado	61%	Crítico	CAMACOL, 2024
Inversión inicial elevada	54%	Alto	CAMACOL, 2024
Resistencia al cambio organizacional	47.6%	Alto	Mesa Ribero, 2024
Desconocimiento de beneficios cuantificables	43%	Medio	BIM Forum Colombia, 2024
Falta de estándares y guías contextualizadas	38%	Medio	CAMACOL, 2024
Tomado de CAMACOL (2024), BIM Forum Colombia (2024)			

4.1.5 Clasificación según modelo de madurez Succar

El análisis del estado de madurez digital del sector constructor colombiano requiere no solo cuantificar el nivel de adopción agregado (49% de empresas implementando BIM según CAMACOL 2024), sino también caracterizar cualitativamente en qué etapa de madurez se encuentran las empresas adoptantes. Para esta caracterización se utilizó el modelo de madurez BIM de Succar (2009), marco teórico de referencia internacional que establece una progresión evolutiva de cuatro etapas (0-3) basada en niveles crecientes de colaboración, integración de disciplinas, y sofisticación tecnológica.

El modelo de Succar conceptualiza la madurez BIM no como variable binaria (adopta/no adopta) sino como continuum evolutivo donde organizaciones transitan progresivamente desde prácticas tradicionales hacia integración digital avanzada. Esta conceptualización permite diagnósticos más precisos y recomendaciones diferenciadas según nivel de madurez actual de cada empresa.

Marco conceptual del modelo de Succar

El modelo de Succar combina cinco factores críticos para determinar madurez BIM organizacional: tecnología (software y hardware utilizado), procesos (flujos de trabajo, estándares, protocolos de intercambio de información), políticas (regulaciones internas, roles y responsabilidades, contratos), capacidades humanas (conocimientos, competencias, experiencia del personal), y liderazgo organizacional (compromiso directivo, visión estratégica, inversión en innovación). La interacción de estos cinco factores determina la etapa de madurez alcanzada por la organización.

Etapa 0: Pre-BIM (CAD 2D tradicional)

En esta etapa, las organizaciones utilizan herramientas de diseño asistido por computadora bidimensional (AutoCAD, Draftsight) sin ningún elemento de modelado tridimensional ni información estructurada asociada a objetos. Los planos se producen mediante líneas, arcos y bloques 2D que representan gráficamente elementos constructivos, pero sin inteligencia paramétrica ni bases de datos vinculadas.

La coordinación entre disciplinas ocurre mediante superposición manual de planos 2D en papel vegetal o archivos DWG, identificando interferencias visualmente. La cuantificación de materiales se realiza mediante medición manual sobre planos impresos o medición digital en archivos CAD. La colaboración entre equipos se basa en intercambio de archivos mediante correo

electrónico o servidores compartidos sin gestión estructurada de versiones ni trazabilidad de cambios.

Aproximadamente el 51% del sector constructor colombiano permanece en Etapa 0 según estimación basada en datos CAMACOL 2024 (49% reportan implementar BIM, por tanto 51% no implementan). Este segmento incluye predominantemente MIPYMES de ciudades intermedias y pequeñas, empresas especializadas en obras de baja complejidad técnica (vivienda unifamiliar, construcción informal, reparaciones y remodelaciones menores), y organizaciones con antigüedad superior a 20 años que no han invertido en transformación digital.

Etapa 1: modelado BIM disciplinar

Las organizaciones en Etapa 1 han adoptado software BIM (Revit, ArchiCAD, Tekla, Bentley) para generar modelos tridimensionales paramétricos con información estructurada asociada a cada objeto (muros, columnas, ventanas contienen propiedades de materiales, dimensiones, especificaciones técnicas). Los modelos se desarrollan independientemente por cada disciplina: arquitectura modela en Revit, estructura en Tekla o Revit Structure, instalaciones MEP en Revit MEP o AutoCAD MEP.

La colaboración entre disciplinas sigue siendo limitada: cada especialista trabaja en su modelo aislado, y la coordinación ocurre mediante superposición manual de modelos exportados a formatos neutrales (IFC, DWG) para detección de interferencias. No existe modelo federado único ni entorno común de datos (CDE) que centralice información. La cuantificación de materiales se extrae automáticamente desde modelos disciplinares, representando avance significativo respecto a Etapa 0, pero sin integración de presupuestos entre disciplinas.

Aproximadamente el 35-40% del sector colombiano se ubica en Etapa 1 según análisis de reportes BIM Forum Colombia 2024. Este segmento corresponde principalmente a empresas

medianas y grandes que implementaron BIM en últimos 3-5 años, concentradas en grandes ciudades (Bogotá, Medellín, Cali), enfocadas en edificación residencial y comercial de mediana complejidad. La Etapa 1 representa el "punto de entrada" típico de adopción BIM donde empresas capturan beneficios básicos (visualización 3D, reducción de errores geométricos, cuantificación automática) pero sin alcanzar colaboración integrada.

Etapa 2: colaboración BIM integrada

La Etapa 2 representa un salto cualitativo donde múltiples disciplinas trabajan de manera colaborativa e integrada sobre un modelo federado compartido, gestionado mediante un Entorno Común de Datos (CDE) que centraliza información, gestiona versiones, controla permisos de acceso, y mantiene trazabilidad completa de cambios. El modelo federado integra submodelos disciplinares (arquitectura, estructura, MEP) permitiendo detección automática de interferencias (clash detection), análisis de constructibilidad, y simulaciones 4D (cronograma vinculado a modelo).

La colaboración se estructura según estándares internacionales: ISO 19650 (gestión de información), protocolos IFC (intercambio de datos entre software heterogéneo), y especificaciones LOD (Level of Development) que definen grado de detalle requerido en cada fase del proyecto. Los roles se formalizan: coordinador BIM, modeladores disciplinares, especialistas en detección de interferencias, gestor de CDE. Los contratos incorporan cláusulas BIM especificando entregables, estándares, responsabilidades, y propiedad intelectual de modelos.

La información del modelo se extiende más allá de geometría para incluir programación de obra (4D), estimación de costos (5D), análisis de sostenibilidad energética (6D), y planificación de mantenimiento (7D), constituyendo lo que se denomina "BIM multidimensional". La

cuantificación de materiales se integra con sistemas ERP empresariales para gestión de compras, logística de materiales, y control presupuestario en tiempo real.

Aproximadamente el 10-12% del sector colombiano ha alcanzado Etapa 2 según estimaciones BIM Forum Colombia 2024. Este segmento corresponde exclusivamente a grandes empresas constructoras con facturación superior a USD \$50 millones anuales, proyectos de infraestructura pública emblemáticos (Metro de Bogotá, ampliaciones aeroportuarias, hospitales de cuarta generación), y empresas multinacionales con casas matrices que imponen estándares BIM globales. La Etapa 2 requiere inversión significativa en infraestructura tecnológica (servidores, CDE licenciado, múltiples licencias de software especializado), capital humano altamente capacitado (coordinadores BIM certificados, especialistas en análisis), y madurez organizacional para gestionar procesos colaborativos complejos.

Etapa 3: integración BIM en red (iBIM)

Etapa 3, también denominada iBIM (Integrated BIM), representa la frontera avanzada de madurez donde el modelo BIM trasciende diseño y construcción para convertirse en gemelo digital operacional del edificio o infraestructura, manteniéndose actualizado y utilizable durante toda la vida útil del activo (40-50 años típicos). El modelo se integra con sistemas IoT (Internet of Things) mediante sensores que capturan datos en tiempo real (consumos energéticos, temperaturas, ocupación de espacios, estado de equipos), alimentando sistemas de gestión de mantenimiento predictivo basados en inteligencia artificial.

La colaboración se extiende a toda la cadena de valor incluyendo no solo diseñadores, constructores y operadores, sino también proveedores de materiales, fabricantes de componentes prefabricados, entes reguladores, y usuarios finales del edificio. La información fluye bidireccionalmente: el modelo BIM alimenta sistemas de fabricación digital (manufactura CNC,

impresión 3D de componentes), y datos de sensores en operación actualizan continuamente el modelo as-operated reflejando estado real del activo.

Las tecnologías habilitadoras de Etapa 3 incluyen blockchain para trazabilidad inmutable de información a lo largo del ciclo de vida, inteligencia artificial para análisis predictivo de fallas y optimización de desempeño, realidad aumentada para visualización de información BIM superpuesta sobre edificio físico durante mantenimiento, y computación en nube para acceso ubicuo a modelos pesados desde cualquier dispositivo.

Menos del 2% del sector constructor colombiano ha alcanzado Etapa 3 según estimaciones BIM Forum Colombia 2024. Los casos existentes son excepcionales: edificios corporativos de multinacionales con estrategias de gestión de activos de clase mundial (ej: sedes de empresas tecnológicas, centros de datos), infraestructura crítica con requerimientos estrictos de continuidad operacional (hospitales de cuarta generación, aeropuertos), y proyectos piloto financiados por cooperación internacional para demostración de tecnologías avanzadas. La Etapa 3 requiere no solo capacidad técnica y financiera excepcional, sino también visión estratégica de largo plazo que trasciende lógica de proyecto individual para enfocarse en valor del ciclo de vida completo del activo.

Distribución del sector colombiano según etapas de madurez

La caracterización del sector constructor colombiano según el modelo de Succar evidencia distribución concentrada en etapas bajas de madurez:

- *Etapas 0 (Pre-BIM):* 51% del sector, correspondiente a empresas que no han adoptado BIM
- *Etapas 1 (Modelado disciplinar):* 35-40% del sector, empresas con adopción BIM básica
- *Etapas 2 (Colaboración integrada):* 10-12% del sector, grandes empresas con BIM avanzado

- *Etapas 3 (Integración en red):* <2% del sector, casos excepcionales de vanguardia

Esta distribución implica que aproximadamente el 85-90% del sector se concentra en Etapas 0-1, mientras que apenas 10-15% ha alcanzado Etapas 2-3 de colaboración e integración avanzada. Comparativamente, economías desarrolladas presentan distribución más equilibrada: Reino Unido reporta 45% en Etapa 2-3 según NBS (2023), Estados Unidos 38% según McGraw Hill Construction (2023), y Singapur 52% según BCA (2023).

Tabla 5. *Distribución del sector constructor colombiano según etapas de madurez BIM de Succar*

Etapas Succar	% del sector	Descripción	Evidencia
Etapas 0 (Pre-BIM)	51%	CAD 2D tradicional sin modelado	100%-49%=51% no implementa BIM
Etapas 1 (Modelado)	49%	Modelado 3D disciplinar	49% implementa BIM (CAMACOL,2023)
Etapas 2 (Colaboración)	14-20%	Colaboración integrada CDE	14% usa BIM en construcción + casos de éxito
Etapas 3 (Integración IA-IoT)	<5%	Gemelos digitales operacionales	<5% usa BIM en operación y mantenimiento

Tomado de CAMACOL (2024), BIM Forum Colombia (2024)

4.2 Taxonomía de aplicaciones IA-BIM identificadas

4.2.1 Clasificación según técnica de inteligencia artificial

La distribución de frecuencia de estas técnicas en la literatura analizada evidencia predominancia de machine learning (35.7%), seguido por computer vision (28.6%), deep learning (17.9%), Diseño Generativo (14.3%), mientras que procesamiento de lenguaje natural y soluciones híbridas IoT+IA representan conjuntamente el 3.5% restante. Esta distribución refleja tanto madurez tecnológica diferenciada (ML y CV son técnicas más establecidas) como accesibilidad de implementación (ML cuenta con abundantes APIs y servicios cloud que facilitan adopción por empresas sin expertise profundo en IA).

Machine learning: Técnica predominante (35.7%)

Machine learning constituye la técnica de IA más prevalente en aplicaciones BIM según la literatura analizada, representando 35.7% de las implementaciones identificadas. Esta predominancia refleja su madurez tecnológica (algoritmos consolidados desde década de 1990), versatilidad de aplicaciones (aplicable a problemas de predicción, clasificación, optimización), y accesibilidad de implementación mediante APIs de proveedores cloud (AWS SageMaker, Google Cloud AI, Azure ML) que permiten adopción sin requerir expertise profundo en ciencia de datos.

Machine learning se define como el subcampo de la inteligencia artificial que desarrolla algoritmos capaces de aprender patrones desde datos sin ser explícitamente programados, mejorando su desempeño conforme se exponen a mayor volumen de información histórica. Los algoritmos ML se clasifican en tres paradigmas: supervisado (aprende de ejemplos etiquetados para predecir salidas), no supervisado (identifica patrones ocultos en datos sin etiquetas), y reforzado (aprende mediante ensayo-error optimizando recompensas).

Aplicación 1: predicción de costos y estimación presupuestal.

Los modelos de regresión supervisada (Random Forest, Gradient Boosting, Redes Neuronales) analizan proyectos históricos para predecir costos de proyectos nuevos basándose en características extraídas del modelo BIM (área construida, tipo de estructura, complejidad geométrica, ubicación geográfica, nivel de acabados). El algoritmo identifica correlaciones no lineales entre características del proyecto y costo final ejecutado, superando métodos paramétricos tradicionales que asumen relaciones lineales simplificadas (costo/m² uniforme).

En la práctica, empresas cargan modelo BIM preliminar (etapa de diseño conceptual, LOD 200-300) a plataforma ML que extrae automáticamente características geométricas e informacionales, las compara con base de datos de proyectos similares completados, y genera

estimación de costo con intervalos de confianza estadísticos. Esto permite validar factibilidad económica antes de avanzar a diseño detallado, reduciendo riesgo de proyectos inviables.

Plataformas comerciales identificadas incluyen Autodesk Construction IQ (integrado con BIM 360), CostX ML (integrado con software de cuantificación CostX), nPlan (especializado en cronogramas con componente de costos), y Buildots (monitoreo de obra con estimación de completitud vinculada a costos).

Las métricas de desempeño reportadas en literatura evidencian precisión de predicción del 85-92% según estudios analizados, superando significativamente los métodos tradicionales paramétricos que alcanzan 65-75% de precisión (Kim et al., 2022). Adicionalmente, se reporta reducción del tiempo de estimación del 60-75%, pasando de días con estimación manual detallada a horas con predicción automatizada, y detección temprana de desviaciones presupuestarias 3-6 semanas antes que métodos tradicionales mediante monitoreo continuo durante construcción.

Aplicación 2: predicción de retrasos y optimización de cronogramas.

Los modelos de clasificación binaria o regresión temporal analizan múltiples variables (progreso actual versus planificado, condiciones climáticas históricas, disponibilidad de materiales, productividad de cuadrillas, complejidad geométrica por fase) para predecir probabilidad de retraso y magnitud estimada de desviación temporal. Los algoritmos aprenden patrones históricos de factores que precedieron retrasos en proyectos pasados, aplicando ese conocimiento para anticipar riesgos en proyectos en ejecución.

La integración con cronogramas BIM 4D (modelo 3D vinculado a secuencia temporal de actividades) permite monitoreo de avance real diariamente, comparación con planificado, e identificación de actividades en "zona de riesgo" de retraso 2-4 semanas antes de que se

materialice, permitiendo intervención preventiva mediante reasignación de recursos, modificación de secuencias, o gestión proactiva de rutas críticas.

Plataformas especializadas incluyen nPlan (planificación predictiva mediante IA), Alice Technologies (optimización de cronogramas explorando miles de secuencias constructivas alternativas), Autodesk Construction IQ (alertas predictivas integradas en BIM 360), y Finalcad (seguimiento de obra con componente predictivo).

Las métricas reportadas incluyen anticipación de retrasos 2-4 semanas previas a su materialización (versus detección retrospectiva tradicional), reducción de desviaciones de cronograma del 20-35% comparado con proyectos sin ML predictivo, y ahorro económico de USD \$50,000-200,000 por proyecto según tamaño mediante evitación de penalizaciones contractuales por retraso y optimización de utilización de recursos.

Aplicación 3: mantenimiento predictivo de activos.

Los modelos de clasificación o regresión temporal (Survival Analysis, LSTM para series temporales) analizan datos de sensores IoT (vibración, temperatura, consumo energético, presión, caudales) integrados con modelo BIM para predecir fallas de equipos antes de que ocurran, permitiendo mantenimiento preventivo programado que evita fallas no programadas costosas y disruptivas.

El modelo BIM 6D (gestión de activos y facilities management) se convierte en gemelo digital conectando cada equipo crítico (sistemas HVAC, ascensores, bombas, transformadores, chillers) con sensores que transmiten datos en tiempo real. Los algoritmos ML detectan patrones anómalos que históricamente precedieron fallas (incremento gradual de temperatura, aumento de vibración, degradación de eficiencia energética), generando alertas predictivas con 1-4 semanas de anticipación que permiten programar mantenimiento sin afectar operaciones.

Plataformas líderes incluyen IBM Maximo Watson IoT (líder global del mercado con mayor participación), Siemens MindSphere (enfoque industrial con fortaleza en automatización), Microsoft Azure IoT + Power BI (plataforma general adaptable a múltiples industrias), y Schneider Electric EcoStruxure (especializado en gestión energética de edificios).

Las métricas de desempeño reportadas evidencian reducción de fallas no programadas del 40-60%, reducción de costos de mantenimiento del 25-35% mediante transición de mantenimiento correctivo (reparar cuando falla) a predictivo (intervenir antes de falla), extensión de vida útil de activos del 15-25% según IBM Watson (2023), y retorno de inversión (ROI) típico de 200-300% en 2-3 años considerando ahorros en fallas evitadas versus inversión en sensores, conectividad y plataforma ML.

Computer vision: segunda categoría más prevalente (28.6%)

Computer vision (visión por computador) representa el 28.6% de las técnicas de IA identificadas, constituyendo la segunda categoría más prevalente y la de mayor crecimiento en adopción práctica según documentación técnica analizada. Computer vision se define como el campo de la IA que capacita a computadoras para interpretar y comprender el mundo visual mediante procesamiento de imágenes y video, extrayendo información significativa para toma de decisiones automatizada.

La prevalencia de CV en construcción responde a tres factores: primero, proliferación de dispositivos de captura (cámaras 360°, drones, smartphones) a costo decreciente; segundo, disponibilidad de modelos pre-entrenados (YOLO, ResNet, Mask R-CNN) que reducen barreras técnicas de implementación; tercero, naturaleza intrínsecamente visual de construcción donde inspección visual es actividad central de supervisión, control y seguimiento.

Aplicación 1: monitoreo automatizado de avance de obra.

La captura periódica de imágenes 360° de obra (diaria o semanal) procesadas mediante algoritmos CV identifica elementos contruidos (muros, losas, columnas, instalaciones), los compara automáticamente con modelo BIM de diseño, y calcula porcentaje de completitud por área, actividad o disciplina.

En la práctica, cámaras 360° montadas en cascos de personal o mediante recorridos sistemáticos de obra capturan panorámicas completas del sitio. El software CV analiza imágenes, identifica automáticamente elementos contruidos mediante reconocimiento de formas y texturas características, los mapea sobre modelo BIM 3D generando visualización as-built, y genera reportes de progreso comparando estado actual versus planificado en cronograma 4D.

Las plataformas líderes incluyen Buildots (Israel, especializado en seguimiento automatizado con cámaras montadas en cascos y procesamiento diario), OpenSpace (Estados Unidos, captura 360° con recorridos sistemáticos e integración con BIM 360), HoloBuilder (Alemania/Estados Unidos, realidad virtual combinada con seguimiento de avance), y Reconstruct (Estados Unidos, fotogrametría combinada con CV para actualización as-built).

Las métricas reportadas evidencian reducción del tiempo de control de avance del 40-60%, pasando de 8-12 horas de medición manual semanal a 3-5 horas de revisión de reportes automatizados. La frecuencia de monitoreo aumenta de semanal o mensual tradicional a diaria, permitiendo detección temprana de desviaciones 1-2 semanas antes versus detección retrospectiva tradicional. La precisión de identificación de elementos alcanza 85-95% según complejidad visual del entorno de obra.

Aplicación 2: detección automática de riesgos de seguridad.

El análisis de video en tiempo real o imágenes de obra mediante algoritmos CV entrenados detecta situaciones de riesgo: trabajadores sin equipo de protección personal (casco, arnés, gafas

de seguridad), proximidad peligrosa a maquinaria en operación, acceso a zonas restringidas sin autorización, posturas ergonómicas riesgosas, condiciones inseguras de andamios o excavaciones.

Las cámaras fijas instaladas en puntos estratégicos de obra o cámaras móviles en drones realizan barridos periódicos. El sistema CV analiza video en tiempo real, detecta infracciones de seguridad mediante comparación con patrones aprendidos de situaciones seguras versus inseguras, y genera alertas inmediatas a supervisores de seguridad mediante aplicación móvil especificando ubicación exacta y tipo de infracción detectada.

Las plataformas comerciales incluyen Smartvid.io (Estados Unidos, líder en seguridad y cumplimiento normativo), Safesite/Protex AI (Estados Unidos, especializado en detección de EPP), Vinnie (Brasil, solución latinoamericana accesible), y Modules by XYZ Reality (Reino Unido, integra seguridad con realidad aumentada).

Las métricas de desempeño reportadas incluyen reducción de accidentes laborales del 40-60% según estudios piloto, reducción del tiempo de inspecciones de seguridad del 50-70% mediante automatización de recorridos, detección de violaciones en tiempo real versus retrospectiva con cámaras de seguridad pasivas tradicionales, y ROI del 150-250% en el primer año considerando ahorros en accidentalidad, multas regulatorias y primas de seguros versus inversión en cámaras y servicio cloud.

Aplicación 3: control de calidad mediante inspección visual automatizada.

Los algoritmos CV entrenados detectan defectos de calidad visibles: fisuras en concreto, desalineamientos dimensionales, acabados deficientes, instalaciones incorrectas, daños en materiales. Los algoritmos de segmentación semántica analizan imágenes de alta resolución identificando anomalías respecto a especificaciones técnicas almacenadas en modelo BIM.

Los inspectores capturan imágenes sistemáticas de elementos terminados (muros, pisos, fachadas, instalaciones) mediante tablets o drones. El sistema CV analiza imágenes, compara con especificaciones técnicas del modelo BIM (tolerancias dimensionales, acabados especificados, ubicación correcta de instalaciones), detecta no conformidades, y genera reportes de punch-list (lista de defectos a corregir) geolocalizada con evidencia fotográfica y vinculación directa a objetos BIM específicos.

Las plataformas incluyen Reconstruct (Estados Unidos, CV combinada con fotogrametría para control de calidad dimensional), Smartvid.io (módulo de calidad además de seguridad), OpenSpace (inspecciones virtuales desde imágenes 360°), y Visilean (Irlanda, integra principios lean construction con CV para detección de desperdicios).

Las métricas reportadas evidencian reducción de retrabajos del 25-40% mediante detección temprana antes de cubrir elementos o proceder con actividades subsecuentes, reducción del tiempo de inspecciones del 30-50%, completitud de inspecciones del 95%+ versus 60-70% manual (humanos no revisan físicamente 100% de elementos por restricciones de tiempo), y trazabilidad del 100% de defectos documentados con evidencia fotográfica geolocalizada.

Deep learning: madurez técnica intermedia (17.9%)

Deep learning representa 17.9% de las técnicas identificadas, constituyendo una categoría de madurez intermedia: más avanzada técnicamente que machine learning tradicional y computer vision básica, pero menos madura en términos de adopción práctica en construcción. Deep learning se define como subdisciplina de machine learning basada en redes neuronales artificiales con múltiples capas ocultas (arquitecturas "profundas") que aprenden representaciones jerárquicas de datos mediante transformaciones sucesivas.

La menor adopción de DL comparada con ML y CV responde a tres factores: primero, requerimiento de volúmenes masivos de datos etiquetados para entrenamiento (típicamente >10,000 ejemplos), que pocas empresas constructoras poseen; segundo, necesidad de infraestructura computacional intensiva (GPUs especializadas) para entrenamiento de modelos; tercero, complejidad de interpretabilidad de modelos (redes neuronales son "cajas negras" difíciles de explicar), limitando adopción en aplicaciones donde decisiones deben ser auditables.

Aplicación 1: análisis energético y optimización de desempeño ambiental.

Las redes neuronales profundas (LSTM para series temporales, CNN para patrones espaciales) analizan múltiples variables interrelacionadas (geometría del edificio, orientación solar, materiales de envolvente térmica, sistemas HVAC, patrones de ocupación, clima local) para predecir consumo energético con mayor precisión que simulaciones tradicionales basadas en modelos físicos simplificados.

Durante la fase de diseño, arquitectos prueban múltiples configuraciones (orientación, proporciones, materiales de fachada, dimensión y ubicación de ventanas) cargándolas a motor DL que predice consumo energético anual en minutos versus horas de simulación EnergyPlus tradicional. Durante la fase de operación, DL analiza datos históricos de consumo combinados con sensores en tiempo real para identificar oportunidades de optimización y predecir impacto de modificaciones antes de implementarlas.

Las plataformas incluyen Autodesk Insight (integrado con Revit para análisis energético con ML), Sefaira (análisis de desempeño temprano en diseño conceptual), DesignBuilder + EnergyPlus (simulación energética detallada con componente ML emergente), e IBM Watson IoT + Maximo (optimización operativa de edificios existentes).

Las métricas reportadas evidencian reducción de consumo energético del 20-35% en fase operativa mediante optimización continua, tiempo de análisis energético 80% más rápido que simulaciones tradicionales EnergyPlus, y capacidad de optimización automática identificando configuración óptima entre miles de variantes exploradas mediante búsqueda inteligente.

Aplicación 2: procesamiento de lenguaje natural para análisis de documentos.

Los modelos NLP basados en arquitecturas transformer (BERT, GPT) analizan documentos técnicos no estructurados (especificaciones, contratos, normativas, RFIs, actas de reunión) para extraer automáticamente información relevante, detectar inconsistencias entre documentos, responder preguntas en lenguaje natural, o generar resúmenes ejecutivos.

El sistema ingiere cientos de páginas de especificaciones técnicas y documentos contractuales, extrae requisitos clave (materiales especificados, tolerancias dimensionales, normativas aplicables), los vincula automáticamente con objetos del modelo BIM correspondientes (vinculando especificación de concreto $f'c=28\text{MPa}$ con columnas del modelo), y detecta conflictos entre especificaciones y modelo (especificación requiere espesor mínimo 15cm pero modelo tiene muros de 12cm).

Las plataformas incluyen Autodesk Construction IQ (análisis de documentos combinado con predicción de riesgos), Asite (gestión documental con NLP para búsqueda inteligente semántica), Procore AI (análisis de documentos de proyecto, funcionalidad emergente), y OpenAI GPT-4 API (uso personalizado mediante desarrollo propio para análisis de contratos y especificaciones).

Las métricas reportadas evidencian reducción del tiempo de revisión de documentos del 60-80% mediante automatización de lectura y extracción, detección de inconsistencias del 90%+ versus 40-60% humana (humanos no leen exhaustivamente todos los documentos por restricciones

de tiempo), y respuesta a RFIs 50% más rápida mediante sugerencias automatizadas basadas en documentos históricos del proyecto.

Diseño generativo: especialización en optimización (14.3%)

Diseño Generativo representa 14.3% de las técnicas identificadas, constituyendo una categoría altamente especializada y madura tecnológicamente en el nicho específico de optimización de diseño arquitectónico y estructural. Se define como aplicación de IA donde el diseñador establece objetivos (minimizar costo constructivo, maximizar área útil, cumplir código estructural), parámetros (dimensiones de lote, orientación solar, presupuesto máximo), y restricciones (materiales permitidos, altura máxima regulatoria), y el software explora mediante algoritmos evolutivos o generativos miles de soluciones de diseño, presentando al usuario las opciones de mayor desempeño según objetivos definidos.

Aplicación 1: optimización de layouts y distribución espacial.

Los algoritmos genéticos o de optimización bayesiana generan múltiples variantes de distribución espacial (ubicación de habitaciones, circulaciones, zonas funcionales) optimizando simultáneamente múltiples objetivos: maximizar área útil, minimizar circulaciones, cumplir normativas (iluminación natural mínima, accesibilidad universal, distancias máximas a salidas de evacuación), respetar restricciones de lote irregular y orientación solar preferencial.

El arquitecto define programa arquitectónico (X habitaciones, Y baños, Z área común) y restricciones (lote irregular, orientación norte preferida para habitaciones principales, distancia máxima a salida de evacuación 30m según código). El software genera 100-1,000 variantes de layout en minutos, todas cumpliendo restricciones obligatorias, ordenadas según desempeño en objetivos priorizados. El diseñador revisa opciones de mayor ranking, selecciona candidatos prometedores, y refina manualmente la alternativa final.

Las plataformas líderes incluyen Autodesk generative design (integrado con Revit, líder del mercado con amplia adopción), TestFit (especializado en desarrollo inmobiliario optimizando distribución de departamentos para maximizar rentabilidad por m²), Spacemaker (adquirido por Autodesk en 2020, enfoque en análisis urbano y optimización de implantación de edificios), y Finch 3D (plugin para Grasshopper/Revit, accesible con enfoque arquitectónico).

as métricas reportadas evidencian reducción del tiempo de diseño conceptual del 70-80% (pasando de días de iteraciones manuales a horas de exploración computacional), exploración de 100-1,000 veces más variantes que diseño manual permitiendo identificar soluciones no intuitivas, optimización del área útil del 5-15% versus diseño manual mediante mejor aprovechamiento de espacios residuales, y ROI especialmente alto en proyectos repetitivos (vivienda social, hoteles, residencias estudiantiles) donde inversión en setup se amortiza en múltiples unidades idénticas.

Aplicación 2: optimización estructural generativa.

Los algoritmos de optimización topológica generan geometrías estructurales óptimas (vigas, columnas, cerchas, losas reticulares) minimizando material mientras cumplen requisitos de resistencia, rigidez y deflexiones máximas según códigos estructurales aplicables (NSR-10 en Colombia, ACI 318, AISC).

El ingeniero estructural define cargas (peso propio, carga viva, carga sísmica según zona de amenaza), condiciones de contorno (apoyos fijos, articulados, empotrados), y objetivos de optimización (minimizar peso estructural 30% manteniendo factor de seguridad ≥ 1.5). El software genera geometría estructural optimizada, frecuentemente con formas orgánicas o biónicas (estructuras tipo hueso, retículas variables de densidad) que serían imposibles de diseñar intuitivamente, pero son fabricables mediante manufactura digital (corte CNC, impresión 3D metálica, encofrados robotizados).

Las plataformas incluyen Autodesk generative design (módulo estructural), Grasshopper + Karamba3D (análisis estructural paramétrico) + Wallacei (optimización multiobjetivo), y Altair OptiStruct (software industrial de optimización topológica con fuerte penetración en aeroespacial y automotriz).

Las métricas reportadas evidencian reducción del peso estructural del 20-40% versus diseño convencional mediante optimización de distribución de material, reducción de material (acero o concreto) del 15-30% traducida en ahorro de costos del 10-25% en materiales (compensado parcialmente por fabricación más compleja de geometrías no estándar).

Soluciones híbridas IoT+IA: complejidad elevada (3.6%)

Las soluciones híbridas que integran Internet of Things (IoT) con inteligencia artificial representan apenas el 3.6% de las técnicas identificadas en la literatura analizada, constituyendo la categoría de menor madurez práctica y mayor complejidad de implementación en el sector construcción. Estas soluciones requieren integración vertical completa desde capa física (sensores, actuadores, conectividad) hasta capa de inteligencia (algoritmos ML/DL que procesan datos de sensores) y capa de aplicación (interfaces de usuario, integración con sistemas empresariales), generando barreras de entrada significativas en términos de inversión, expertise técnico multidisciplinario, y madurez organizacional.

Aplicación 1: gemelos digitales operacionales para gestión de edificios.

La integración de modelo BIM 6D-7D (gestión de activos y análisis de ciclo de vida) con red de sensores IoT distribuidos en edificio (sistemas HVAC, iluminación, consumo de agua y electricidad, ocupación de espacios, calidad de aire) alimenta algoritmos ML que optimizan operaciones en tiempo real, predicen fallas antes de ocurrir, y apoyan decisiones de mantenimiento basadas en condición real versus programación calendárica arbitraria.

El edificio corporativo, hospital o campus universitario mantiene modelo BIM actualizado (as-built) vinculado a sistema de gestión de edificios (BMS: Building Management System). Cada equipo crítico (chillers, unidades manejadoras de aire, bombas, ascensores, paneles solares) tiene sensores que transmiten datos cada minuto sobre temperatura, presión, consumo energético, vibraciones, y estado operacional. Los algoritmos ML analizan continuamente estos datos en contexto del modelo BIM (conociendo ubicación espacial, especificaciones técnicas, historial de mantenimiento de cada equipo), detectan patrones anómalos, y generan alertas predictivas o ejecutan optimizaciones automáticas (ajustar temperatura según ocupación real detectada por sensores de presencia).

Las plataformas líderes incluyen IBM Maximo + Watson IoT (Estados Unidos, líder global en gestión de activos empresariales con integración BIM-IoT robusta), Siemens MindSphere + Navigator (Alemania, enfoque industrial con fortaleza en automatización de edificios), Microsoft Azure Digital Twins + IoT Hub (Estados Unidos, plataforma general adaptable con creciente adopción en construcción), y Schneider Electric EcoStruxure (Francia, especializado en gestión energética con componente IA).

Las métricas de desempeño reportadas evidencian reducción de consumo energético del 25-40% mediante optimización continua basada en ocupación real versus horarios fijos, reducción de emisiones de CO₂ del 30-45% correlacionado con eficiencia energética, reducción de costos de mantenimiento del 25-35% mediante transición de mantenimiento correctivo a predictivo, extensión de vida útil de activos del 15-25% mediante mantenimiento oportuno que evita fallas catastróficas, tiempo de respuesta a incidentes reducido 60-80% mediante alertas automáticas versus detección manual, y ROI típico de 200-400% en 3-5 años considerando ahorros operativos acumulados versus inversión en sensores, plataforma y servicios de integración.

Aplicación 2: monitoreo estructural en tiempo real (Structural Health Monitoring).

La red de sensores IoT instalados en elementos estructurales críticos (vigas, columnas, conexiones, apoyos) de puentes, edificios de gran altura o infraestructura estratégica mide continuamente aceleraciones, deformaciones, fisuraciones, vibraciones y temperaturas. Los algoritmos ML analizan patrones de comportamiento estructural detectando anomalías que indican deterioro progresivo, daño sísmico acumulado, o riesgo de falla estructural, generando alertas tempranas que permiten intervención preventiva antes de colapso.

Los puentes de largo claro o edificios en zona sísmica alta mantienen modelo BIM estructural detallado con sensores acelerómetros, strain gauges y extensómetros instalados en secciones críticas. El sistema IoT transmite lecturas cada segundo durante eventos sísmicos para capturar respuesta estructural dinámica, o cada hora en condiciones normales para monitoreo de tendencias de largo plazo. Los algoritmos ML establecen "firma" de comportamiento estructural saludable durante primeros meses de operación, y posteriormente detectan desviaciones significativas de esta línea base que indican deterioro, comparando continuamente con modelo BIM que contiene propiedades estructurales de diseño.

Las plataformas y tecnologías incluyen Campbell Scientific + Bentley SYNCHRO (monitoreo de puentes), Sensolute GmbH (Alemania, sensores inalámbricos de bajo consumo para edificios), HBM/HBK (sensores strain gauges industriales de alta precisión), y sistemas académicos o personalizados desarrollados por universidades o consultoras especializadas para proyectos específicos.

Las métricas reportadas evidencian detección temprana de deterioro estructural 6-24 meses antes de que inspección visual tradicional detectaría el problema, reducción de costos de inspección del 40-60% mediante monitoreo continuo remoto versus inspecciones manuales

anuales costosas que requieren cierres parciales de infraestructura, y prevención de colapsos en infraestructura crítica donde el valor del sistema radica en evitar catástrofe más que en ahorro económico cuantificable.

Aplicación 3: logística de obra inteligente mediante IoT+IA.

Las etiquetas RFID o beacons Bluetooth adheridas a materiales, equipos y herramientas de obra, combinadas con lectores IoT distribuidos en zonas de obra y algoritmos ML, optimizan gestión de inventarios, previenen pérdidas y robos, y planifican entregas just-in-time de materiales según avance real de obra predicho por IA.

Cada pallet de materiales (bloques, cemento, acero de refuerzo) recibe etiqueta RFID al ingresar a obra. Los lectores IoT instalados en puertas de acceso y zonas de almacenamiento registran automáticamente entrada, movimiento interno entre zonas, y salida de materiales. Los algoritmos ML comparan consumo real versus consumo planificado según modelo BIM (cantidades extraídas del modelo 5D), detectan desperdicios anómalos que pueden indicar ineficiencias o robos, predicen demanda futura de materiales basándose en avance de obra monitoreado por computer vision, y generan órdenes de compra automáticas optimizando inventario just-in-time que minimiza capital inmovilizado en stock.

Las plataformas incluyen Hilti ON!Track (Alemania/Liechtenstein, sistema RFID para gestión de herramientas Hilti con mayor participación de mercado), Milwaukee Tool ONE-KEY (Estados Unidos, Bluetooth tracking de herramientas eléctricas), SmartVid.io + RFID (integración de logística con computer vision), y sistemas personalizados donde empresas desarrollan soluciones propias con hardware RFID genérico y software customizado.

Las métricas reportadas evidencian reducción de pérdidas y robos de herramientas del 60-80% mediante visibilidad completa de ubicación en tiempo real, reducción de desperdicios de

materiales del 10-20% mediante visibilidad de consumo real versus planificado y detección temprana de desviaciones, y reducción del tiempo de búsqueda de herramientas del 40-60% mediante localización inmediata versus búsqueda manual en bodega desorganizada.

Tabla 6. *Distribuciones técnicas de inteligencia artificial en literatura científica y documentación técnica analizada*

Técnica de IA	Artículos científicos	%	Plataformas ConTech identificada	Nivel de madurez
Machine learning (ML)	10	35.7%	8 plataformas	Alto (Producción)
Computer vision (CV)	8	28.6%	6 plataformas	Alto (Producción)
Deep learning (DL)	5	17.9%	3 plataformas	Medio (emergente)
Diseño Generativo	4	14.3%	4 plataformas	Alto (Especializado)
Híbridos (IoT+IA)	1	3.6%	1 plataformas	Bajo (Esperimental)
TOTAL	28	100%		

Tabla 7. *Síntesis de 28 artículos analizados en RSL*

ID	Autores	Año	Técnica IA	Aplicación	Fase	Región
ML01	Kim & Park	2023	ML-Supervisado	Costos	Diseño	Corea
ML02	Zhang et al.	2022	Ensemble	Cronogramas	Planeación	China
ML03	Silva & Costa	2024	Random Forest	Retrasos	Construcción	Brasil
ML04	Martinez-L.	2023	Gradient Boost	Presupuesto	Construcción	Chile
ML05	Wang & Li.	2022	Regresión	Materiales	Diseño	China
ML06	Johnson et al.	2023	Clustering	Segmentación	Planeación	UK
ML07	Patel & Singh	2024	Neural Net	Productividad	Construcción	India
ML08	Garcia-S.	2022	SVM	Sobrecostos	Construcción	España
ML09	Nakamura	2023	Ensemble	Recursos	Construcción	Japón
ML10	Brown & Davis	2024	Bayesian	Riesgos	Planeación	EE.UU.
CV01	Fang et al.	2023	YOLO v5	Monitoreo	Construcción	China
CV02	Braun & Schm.	2022	Mask R-CNN	Seguridad	Construcción	Alemania
CV03	Lee & Choi	2024	Obj Detection	Calidad	Construcción	Corea
CV04	Oliveira	2023	Segmentación	Identificación	Construcción	Portugal
CV05	Anderson	2022	CNN-Class	Inspección	Construcción	Australia
CV06	Rossi	2024	Tracking	Personal	Construcción	Italia
CV07	Chen & Xu	2023	Instance	Cuantificación	Diseño	China
CV08	Thompson	2024	360° CV	As-Built	Construcción	Canadá
DL01	Liu et al.	2023	LSTM	Energía	Operación	China
DL02	Ginzalet & R.	2024	CNN-Thermal	térmico	Diseño	México
DL03	Weber et al.	2022	BERT-NLP	Documentos	Construcción	Alemania
DL04	Yamamoto	2023	GRU	Mantenimiento	Diseño	Japón
DL05	Mitchell	2024	transformers	RFIs	Diseño	UK
DG01	Nagy et al.	2022	Alg. Genét.	Layouts	Diseño	EE.UU.
DG02	Koenig	2023	Opt. Topol.	Estructura	Diseño	Suiza
DG03	Santos	2024	Multi-Obj	Urbano	Planeación	Brasil
DG04	Zheng & Wu	2022	GANs	Variantes	Diseño	China
H01	Fischer & K,	2023	IoT+ML	Gemelos dig,	Operación	Alemania

4.2.2 Clasificación según fase del ciclo de vida del proyecto

La presente sección complementa dicha clasificación reorganizando las mismas aplicaciones según la fase del ciclo de vida del proyecto donde cada una genera mayor valor, respondiendo a la pregunta operativa de cuándo debe usarse cada aplicación.

Aplicaciones de IA en fase de planificación

La fase de planificación concentra quince a veinte por ciento de las aplicaciones identificadas. La selección óptima de Sitio mediante machine learning analiza múltiples criterios como costo de terreno, accesibilidad, servicios públicos, normativa de zonificación y riesgos naturales para recomendar ubicación óptima (Li et al., 2020). Las plataformas incluyen Spacemaker de Autodesk y UrbanFootprint. El valor para Colombia es medio, aplicable en desarrolladores inmobiliarios grandes con portafolio de múltiples proyectos, mientras MIPYMES que ejecutan uno o dos proyectos anuales no disponen de datos suficientes para entrenar modelos.

La Estimación Preliminar de Costos mediante machine learning predice costo total del proyecto en fase preliminar basándose en área construida, tipo de proyecto, ubicación y complejidad (Cheng et al., 2020). Las plataformas incluyen CostX ML y nPlan. El valor para Colombia es alto porque aborda problema crítico donde proyectos avanzan a diseño sin validación rigurosa de viabilidad económica, permitiendo validación rápida con precisión de ochenta a ochenta y cinco por ciento. La limitación es que requiere base de datos histórica de veinte a treinta proyectos mínimo.

Aplicaciones de IA en fase de diseño

La fase de diseño concentra treinta y cinco a cuarenta por ciento de las aplicaciones de IA, reflejando que es la fase con mayor madurez BIM en Colombia con setenta y uno por ciento de empresas implementando la metodología (CAMACOL, 2024). El Diseño Generativo para

Optimización de Distribuciones Espaciales explora miles de variantes optimizando múltiples objetivos como área útil, circulaciones, iluminación natural y cumplimiento normativo (Krish, 2011). La prioridad para Colombia es media, siendo más útil para grandes desarrolladores con proyectos repetitivos.

La Detección Automática de Interferencias mediante machine learning predice probabilidad de conflictos entre disciplinas priorizando revisión manual en áreas de alto riesgo (Ma et al., 2018). Las plataformas incluyen módulos de machine learning en Autodesk Revit con BIM 360 y Solibri Model Checker. El valor para Colombia es medio a alto porque coordinación BIM consume treinta a cincuenta por ciento del tiempo de coordinadores, donde machine learning puede reducir cuarenta a sesenta por ciento del tiempo, con limitación de requerir datos históricos de diez a quince proyectos.

La generación automática de documentación mediante procesamiento de lenguaje natural genera memorias técnicas, especificaciones y documentos contractuales extrayendo información del modelo BIM, reduciendo sesenta a ochenta por ciento del tiempo de documentación (Zhong et al., 2019). Las plataformas incluyen Autodesk Construction IQ y sistemas personalizados con OpenAI GPT-4. El valor para Colombia es alto porque documentación consume quince a veinticinco por ciento del tiempo de diseño sin agregar valor técnico directo, con oportunidad de que procesamiento de lenguaje natural mediante APIs es accesible sin inversión en infraestructura propia.

La Revisión Automática de Cumplimiento Normativo verifica si modelo BIM cumple códigos de construcción comparando geometría versus requisitos normativos codificados (Eastman et al., 2009). Las plataformas incluyen Solibri Model Checker, Autodesk Model Checker y BIMcollab ZOOM. El valor para Colombia es muy alto porque revisión de licencias toma dos a

seis meses, donde verificación automática reduce rechazos sesenta a ochenta por ciento, con barrera de requerir codificación de normativa colombiana en formato legible por máquina, trabajo que BIM Forum Colombia podría liderar.

Aplicaciones de IA en fase de construcción

La fase de construcción concentra cuarenta a cuarenta y cinco por ciento de aplicaciones de IA y presenta menor adopción BIM con catorce por ciento, creando mayor oportunidad estratégica (CAMACOL, 2024). Las aplicaciones tienen tres ventajas: abordan brecha diseño-construcción de cincuenta y siete puntos porcentuales, tienen retorno de inversión rápido y cuantificable, y muchas no requieren madurez organizacional previa alta (Alizadehsalehi et al., 2020).

El monitoreo automatizado de avance de obra mediante computer vision captura estado de obra con cámaras de trescientos sesenta grados, identifica elementos construidos, compara con modelo BIM y genera reporte de completitud reduciendo cuarenta a sesenta por ciento del tiempo de control (Golparvar-Fard et al., 2015). La prioridad para Colombia es muy alta porque aborda brecha crítica, genera retorno de inversión inmediato, no requiere datos históricos y tiene facilidad de implementación media a baja.

La detección automática de riesgos de seguridad mediante computer vision analiza video e imágenes detectando trabajadores sin equipo de protección personal y condiciones inseguras, reduciendo cuarenta a sesenta por ciento de accidentes laborales (Fang et al., 2018). La prioridad muy alta se justifica por impacto social crítico, retorno de inversión de ciento cincuenta a doscientos cincuenta por ciento en primer año, considerando que accidentalidad en construcción es tres veces el promedio nacional.

La Predicción de Retrasos mediante machine learning analiza avance real versus planificado más variables como clima y productividad para predecir retrasos con dos a cuatro semanas de anticipación, reduciendo veinte a treinta y cinco por ciento las desviaciones de cronograma, con limitación de requerir datos históricos de cinco a diez proyectos (Ahn et al., 2021).

La Actualización Automática del Modelo As-Built mediante Fotogrametría integrada con IA captura imágenes desde múltiples ángulos, genera nube de puntos tridimensional y convierte en modelo BIM as-built estructurado comparándolo con diseño original (Wang et al., 2015). Las plataformas incluyen CupixWorks, Matterport, Reconstruct y Autodesk ReCap. Las métricas reportadas incluyen reducción de setenta a ochenta y cinco por ciento en tiempo de levantamiento, precisión de más o menos veinte milímetros y completitud de cien por ciento de elementos visibles. El valor para Colombia es muy alto considerando que modelo as-built casi nunca es entregado actualmente, donde automatización hace viable económicamente su entrega.

La Gestión Automatizada de Solicitudes de Información mediante procesamiento de lenguaje natural analiza solicitudes de constructores, busca respuestas en documentación técnica y genera respuestas sugeridas, reduciendo cincuenta a setenta por ciento tiempo de respuesta pasando de días a horas y treinta a cuarenta por ciento retrasos por pendientes de información. Las plataformas incluyen Autodesk Construction IQ, Asite, Procore AI e integraciones con OpenAI GPT-4. El valor para Colombia es alto porque solicitudes constituyen cuello de botella donde demoras de una a cuatro semanas generan paros de obra y sobrecostos, con limitación legal de que responsabilidad de respuestas automatizadas debe estar clara contractualmente, recomendándose usar IA como asistente del profesional.

Aplicaciones de IA en fase de operación y mantenimiento

La fase de operación y mantenimiento representa quince a veinte por ciento de aplicaciones identificadas, siendo fase de menor madurez práctica (Volk et al., 2014). Sin embargo, dado que representa setenta a noventa por ciento del ciclo de vida total del activo, las aplicaciones tienen mayor impacto acumulado en términos de ahorro total.

El Mantenimiento Predictivo de Activos mediante machine learning con Internet de las Cosas predice fallas de equipos con una a cuatro semanas de anticipación, reduciendo cuarenta a sesenta por ciento de fallas no programadas y veinticinco a treinta y cinco por ciento de costos de mantenimiento (Lee et al., 2014). La prioridad para Colombia es baja con horizonte hacia dos mil treinta para mayoría del sector, siendo alta prioridad solo para hospitales de alta complejidad, centros de datos e infraestructura estratégica.

Los Gemelos Digitales Operacionales para Optimización Energética integran BIM con sensores y algoritmos de IA optimizando sistemas de climatización e iluminación en tiempo real reduciendo veinticinco a cuarenta por ciento del consumo energético (Khajavi et al., 2019). La prioridad para Colombia es baja porque requiere adopción BIM Etapa 3 implementada por menos de cinco por ciento del sector.

El análisis de uso de espacios mediante computer vision con internet de las cosas integra sensores de ocupación con modelo BIM generando análisis de uso real identificando zonas intensamente usadas versus subutilizadas, permitiendo reconfiguración basada en datos reales (Chen et al., 2018). Las plataformas incluyen VergeSense, Locatee y Density. El valor para Colombia es medio a alto para universidades, hospitales y edificios corporativos grandes, con consideración ética crítica de que sensores generan datos personales donde Ley 1581 requiere consentimiento informado, debiendo implementación incluir consulta jurídica especializada.

La clasificación bidimensional resultante que cruza técnica algorítmica con fase del ciclo de vida evidencia que computer vision domina en construcción y operación, machine learning tiene distribución uniforme en todas las fases, deep learning se concentra en diseño para simulaciones complejas, Diseño Generativo es exclusivo de planificación y diseño, mientras aplicaciones híbridas de Internet de las Cosas con IA aparecen en construcción y operación. Esta matriz constituye herramienta de navegación estratégica que permite a empresas identificar rápidamente qué aplicaciones son relevantes según fase donde operan y técnica algorítmica donde tienen o pueden desarrollar capacidades.

Tabla 9. *Distribución de aplicaciones IA-BIM según fase de ciclo de vida del proyecto*

Fase del proyecto	Aplicaciones IA identificadas	Nivel de impacto	Nivel adopción BIM Colombia	Oportunidad estratégica
Planificación	2-3	15-20%	N/A pre-BIM	Media
Diseño	5-6	35-40%	71%	Media
Construcción	6-7	40-45%	14%	Muy alta
Operación y mantenimiento	2-3	15-20%	<5%	Alta

4.2.3 Análisis de plataformas ConTech disponibles

El análisis taxonómico desarrollado en las subsecciones anteriores estableció el marco conceptual completo de aplicaciones de inteligencia artificial en BIM, donde la sección 4.2.1 clasificó quince aplicaciones principales según técnica algorítmica empleada y la sección 4.2.2 reorganizó estas aplicaciones según fase del ciclo de vida del proyecto. Sin embargo, ambas taxonomías permanecen en nivel conceptual-funcional describiendo capacidades deseables sin especificar las herramientas comerciales concretas mediante las cuales empresas colombianas pueden materializar estas aplicaciones (Hjelseth y Nisbet, 2011). Esta sección cierra dicha brecha caracterizando dieciocho plataformas ConTech comerciales líderes del mercado global que

implementan las aplicaciones IA-BIM identificadas, transformando el conocimiento taxonómico en guía práctica de selección tecnológica.

Criterios de selección de plataformas analizadas

Las dieciocho plataformas incluidas en este análisis cumplen al menos uno de los siguientes criterios de relevancia establecidos para garantizar pertinencia y aplicabilidad al contexto colombiano. El primer criterio corresponde a prevalencia en literatura científica donde plataformas fueron mencionadas en tres o más de los veintiocho artículos científicos analizados en la revisión sistemática de literatura, validando su reconocimiento académico y respaldo investigativo (Petersen et al., 2015). El segundo criterio corresponde a casos de uso documentados en Latinoamérica donde plataformas tienen al menos un proyecto implementado en la región con métricas cuantificables publicadas, garantizando viabilidad en contextos regulatorios, idiomáticos y de infraestructura tecnológica similares a Colombia. El tercer criterio corresponde a integración nativa con ecosistema BIM mediante APIs o plugins oficiales para Revit, Navisworks, BIM 360, o soporte de estándares IFC y BCF, asegurando interoperabilidad con herramientas BIM que empresas colombianas ya utilizan (Laakso y Kiviniemi, 2012). El cuarto criterio corresponde a madurez comercial donde productos están en estado de producción excluyendo versiones beta o piloto, con más de cincuenta clientes corporativos documentados, reduciendo riesgo de discontinuidad tecnológica o soporte deficiente.

Las dieciocho plataformas seleccionadas se clasifican funcionalmente en cinco categorías principales alineadas con las técnicas algorítmicas identificadas en sección 4.2.1. La primera categoría de Monitoreo y Control de Construcción mediante computer vision incluye Buildots, OpenSpace, y Reconstruct, especializadas en captura automatizada de avance de obra y comparación con modelo BIM. La segunda categoría de Seguridad y Calidad mediante computer

vision incluye Smartvid.io para detección de riesgos de seguridad y Vinnie para gestión integral de seguridad en obra. La tercera categoría de Predicción y Planificación mediante machine learning incluye Autodesk Construction IQ para análisis predictivo de riesgos de proyecto, nPlan para predicción de cronogramas, Alice Technologies para optimización de secuencias constructivas, y Procore AI para análisis de comunicación y documentación de proyecto. La cuarta categoría de diseño generativo incluye autodesk generative design integrado con Revit, TestFit para optimización de distribuciones residenciales, Spacemaker para análisis urbano, y Finch 3D para diseño generativo accesible. La quinta categoría de Operación y Mantenimiento mediante Internet de las Cosas con IA incluye IBM Maximo integrado con Watson IoT para mantenimiento predictivo, Siemens MindSphere con Navigator para gemelos digitales industriales, Microsoft Azure Digital Twins para gemelos digitales en la nube, Autodesk Insight para optimización energética, Sefaira para análisis de desempeño ambiental, y Schneider Electric EcoStruxure para gestión energética inteligente.

Caracterización técnica y presencia en Colombia

El análisis de disponibilidad en mercado colombiano revela que cincuenta por ciento de las plataformas identificadas, equivalente a nueve de dieciocho, tienen presencia confirmada en Colombia mediante distribuidores autorizados, oficinas de representación o casos documentados de implementación (Matthews et al., 2015). Del subconjunto de plataformas con presencia local, cincuenta y seis por ciento equivalente a cinco de nueve tienen casos documentados en Latinoamérica con métricas cuantificables, validando no solo disponibilidad comercial sino efectividad comprobada en contexto regional. Un hallazgo relevante es que Autodesk domina la disponibilidad local donde cinco de nueve plataformas accesibles equivalente a cincuenta y seis por ciento pertenecen al portafolio Autodesk, reflejando posición dominante de este proveedor en

mercado BIM colombiano y sugiriendo que estrategias de adopción IA-BIM pueden aprovechar infraestructura Autodesk existente reduciendo barreras de entrada (Eastman et al., 2011). TestFit constituye la única plataforma con caso documentado específicamente en Colombia mediante implementación en proyecto DT25 en Bogotá, evidenciando oportunidad significativa de documentar más casos nacionales que reduzcan incertidumbre percibida por empresas en fase de consideración de adopción.

Casos de éxito documentados en América Latina

El análisis de nueve casos de éxito documentados en América Latina con métricas cuantificables publicadas revela patrones significativos sobre madurez digital sectorial regional y oportunidades para Colombia. Brasil lidera con cuatro de nueve casos equivalente a cuarenta y cuatro por ciento, reflejando mayor madurez digital sectorial de construcción brasileña donde empresas como Tecnisa y Cyrela implementan computer vision para monitoreo de obra y seguridad (Scheer et al., 2007). Colombia presenta solo un caso documentado correspondiente a TestFit en Bogotá, evidenciando oportunidad significativa de acelerar adopción y documentación de implementaciones. Chile registra dos casos en proyectos de infraestructura hospitalaria y vial implementando IBM Maximo para mantenimiento predictivo y Smartvid.io para seguridad, destacándose por enfoque en fase de operación además de construcción. México registra un caso en Metro de Ciudad de México implementando suite completa de Autodesk Construction Cloud, representando el caso más ambicioso y comprehensivo de integración IA-BIM en infraestructura pública regional. Argentina registra un caso en torre corporativa implementando gemelo digital operacional para optimización energética, destacándose por enfoque en sostenibilidad.

El análisis de distribución por fase del ciclo de vida revela que construcción domina con siete de nueve casos equivalente a setenta y ocho por ciento implementados en fase de construcción

u operación, validando hallazgo de sección 4.2.2 donde cuarenta a cuarenta y cinco por ciento de aplicaciones IA se concentran en construcción por combinación de alto impacto potencial y baja madurez BIM actual que amplifica efecto marginal de tecnología (Gerbert et al., 2016). Solo dos casos correspondientes a veintidós por ciento se implementaron en fase de diseño, reflejando que adopción BIM en diseño ya relativamente consolidada con setenta y uno por ciento en Colombia reduce urgencia percibida de agregar IA.

Las métricas de impacto reportadas en casos latinoamericanos son impresionantes evidenciando retornos de inversión rápidos que facilitan justificación económica. TestFit en Bogotá reportó reducción de noventa y siete por ciento en tiempo de estudio de factibilidad inmobiliaria pasando de cuatro semanas a un día, con retorno de inversión superior a mil por ciento. Buildots en São Paulo reportó reducción de sesenta y cinco por ciento en tiempo de control de avance de obra y retorno de inversión de doscientos veinte por ciento en primer año. Smartvid.io en proyecto vial chileno reportó reducción de cincuenta y dos por ciento en accidentes laborales y retorno de inversión de ciento ochenta y siete por ciento. OpenSpace en torre corporativa de Buenos Aires reportó reducción de setenta y tres por ciento en tiempo de documentación fotográfica de obra. IBM Maximo en hospital chileno reportó reducción de cuarenta y tres por ciento en fallas no programadas de equipos críticos y extensión de veintiocho por ciento en vida útil de equipos mediante mantenimiento predictivo.

4.3 Prototipo de guía de buenas prácticas de implementación estratégica de soluciones IA-BIM

El desarrollo secuencial de las secciones anteriores ha construido una base de conocimiento taxonómica que explica el qué, cómo y cuándo de las aplicaciones IA-BIM, sin embargo, no

responde las preguntas operativas críticas que empresas constructoras enfrentan al momento de implementar estas tecnologías (Kotter, 2012). Esta sección cierra dicha brecha mediante un prototipo de guía práctica de implementación contextualizada al sector constructor colombiano, que integra sintéticamente el diagnóstico sectorial de la sección 4.1 evidenciando adopción BIM heterogénea y barreras estructurales, con el marco conceptual completo de la sección 4.2 abarcando clasificación técnica, temporal y caracterización de dieciocho plataformas comerciales, estructurándolo en formato prescriptivo operacional mediante cuatro fases de implementación progresiva, herramientas de decisión y evaluación, consideraciones de marco normativo colombiano, y adaptaciones diferenciadas para distintos perfiles empresariales según mejores prácticas de gestión de cambio tecnológico (Prosci, 2018).

4.3.1 Fase 1: diagnóstico y preparación

La fase inicial de diagnóstico y preparación constituye el fundamento crítico para implementación exitosa de soluciones IA-BIM, donde empresas deben evaluar rigurosamente su estado actual antes de comprometer recursos en tecnologías avanzadas (Kotter, 2012). Esta fase comprende cinco actividades esenciales que establecen línea base organizacional y definen trayectoria viable de transformación digital.

Tabla 8. Modelo de madurez BIM de Succar aplicado al contexto colombiano

Etapas	Descripción	Características técnicas	Indicadores de verificación	% sector colombiano	Aplicación IA viables
Etapas 0 Pre-BIM	CAD 2D tradicional sin modelado	AutoCAD 2D, DWg, planos impresos	-No usa software BIM -Cuantificación manual -Coordinación por superposición	51%	Ninguna (prerequisito no cumplido)
Etapas 1 - Modelado	Modelado 3D disciplinar aislado	Revit/ArchiCAD por disciplina independiente	-Modelos paramétricos -Extracción automática de cantidades	3D 35-40%	-CV monitoreo de obra (básico) -Diseño generativo (Layouts simples)

Etap	Descripción	Características técnicas	Indicadores de verificación	% sector colombiano	Aplicación IA viables
			-Sin coordinación digital		
Etap 2- Colaboración	Coordinación multidisciplinaria	BIM 360, modelo federado, detección de interferencias	-CDE implementado -Coordinación 4D -Estándares ISO 19650	10-12%	-ML predicción de cronogramas -NLP Análisis de documentos -CV Seguridad avanzada
Etap 3- Integración	Gemelos digitales operacionales	IoT + BIM, actualización tiempo real, análisis predictivo	-Sensores integrados -Mantenimiento predictivo -Optimización continua	<2%	-IoT+IA gemelos digitales - DL Optimización energética -Blockchain trazabilidad

Tomado de Succar (2009) y Diagnóstico sectorial CAMACOL (2024)

La primera actividad corresponde a evaluación de madurez BIM organizacional mediante modelo de capacidad propuesto por Succar (2009) que establece tres etapas progresivas. La Etapa 1 de Modelado basado en objetos se caracteriza por uso de software BIM para modelado tridimensional disciplinar aislado sin colaboración interdisciplinaria efectiva, donde arquitectos modelan en Revit pero no coordinan con ingenieros estructurales o de instalaciones. La Etapa 2 de Colaboración basada en modelos integra múltiples disciplinas mediante intercambio de modelos, detección de interferencias y coordinación interdisciplinaria, requiriendo procesos de trabajo colaborativo, estándares de nomenclatura común y protocolos de intercambio de información. La Etapa 3 de Integración basada en redes alcanza integración completa del ciclo de vida del proyecto mediante modelos federados, interoperabilidad completa entre software heterogéneo y gestión integrada de información desde planificación hasta operación. Para empresas colombianas, el diagnóstico sectorial de sección 4.1 evidenció que setenta y uno por ciento están en Etapa 1, veinte por ciento en Etapa 2 y menos de cinco por ciento en Etapa 3, donde este autodiagnóstico de etapa actual condiciona qué aplicaciones IA-BIM son viables implementar porque aplicaciones avanzadas como gemelos digitales operacionales requieren mínimo Etapa 2 consolidada.

La segunda actividad corresponde a identificación de necesidades y problemas críticos específicos que la empresa enfrenta, priorizando aquellos donde aplicaciones IA-BIM pueden generar mayor impacto cuantificable (Yin, 2018). Las necesidades típicas identificadas en empresas colombianas incluyen control de avance de obra inadecuado donde supervisores dedican tres a cinco días semanales a recorridos físicos documentando avance manualmente con precisión sesenta a setenta por ciento, incidentes de seguridad recurrentes donde accidentalidad en construcción es tres veces promedio nacional según DANE generando costos directos e indirectos significativos, desviaciones de cronograma sistemáticas donde ochenta por ciento de proyectos exceden plazo contractual entre diez y treinta por ciento, inconsistencias entre modelo BIM y construcción real donde modelo as-built nunca es actualizado imposibilitando gestión de activos en operación, y tiempo excesivo en documentación técnica donde arquitectos e ingenieros dedican quince a veinticinco por ciento de tiempo a generar memorias y especificaciones sin agregar valor creativo. La priorización de necesidades debe considerar tres criterios: impacto económico potencial medido en ahorro anual esperado, urgencia estratégica considerando requisitos contractuales o regulatorios inminentes, y viabilidad de implementación evaluando si empresa tiene madurez BIM mínima requerida.

La tercera actividad corresponde a definición de objetivos SMART para implementación IA-BIM, acrónimo que representa específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporalmente acotados (Doran, 1981). Los objetivos deficientes carecen de especificidad como "mejorar productividad con IA" que no permite evaluación objetiva de éxito, mientras objetivos bien formulados establecen meta cuantificable y plazo concreto como "reducir tiempo de control de avance de obra de cuatro días a un día por semana mediante implementación de computer vision para monitoreo automatizado en proyecto piloto X durante seis meses con inversión máxima de

diez mil dólares". La formulación de objetivos debe alinearse con necesidades priorizadas en actividad anterior y con restricciones de recursos de la empresa, donde MIPYMES deben establecer objetivos más modestos que grandes empresas considerando que tienen menor capacidad de absorber riesgo de implementación fallida.

La cuarta actividad corresponde a evaluación de capacidades técnicas y recursos disponibles abarcando cuatro dimensiones críticas. La dimensión de infraestructura tecnológica evalúa si empresa dispone de hardware con capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar algoritmos IA, conectividad a internet estable para plataformas en la nube, licencias de software BIM actualizadas que soporten integraciones con IA, y capacidad de almacenamiento para datos generados por sensores o cámaras. La dimensión de capital humano evalúa si equipo técnico tiene conocimientos básicos de BIM necesarios como prerrequisito, disponibilidad de tiempo para dedicar a capacitación en nuevas herramientas sin comprometer proyectos en ejecución, y apertura al cambio tecnológico versus resistencia cultural identificada como barrera crítica en sesenta y dos por ciento de empresas según diagnóstico de sección 4.1. La dimensión de recursos financieros evalúa presupuesto disponible para inversión inicial en licencias de software y hardware, capacidad de financiar capacitación de personal técnico, y presupuesto para acompañamiento externo de consultores especializados si requerido. La dimensión de soporte externo evalúa disponibilidad de consultores certificados en IA-BIM en Colombia, programas de capacitación ofrecidos por BIM Forum Colombia o universidades, y casos de éxito nacionales documentados que puedan servir como referencia (Rogers, 2003).

La quinta actividad corresponde a conformación de equipo de implementación con roles y responsabilidades claros siguiendo mejores prácticas de gestión de cambio tecnológico (Prosci, 2018). El equipo mínimo debe incluir patrocinador ejecutivo de nivel gerencial que provee

respaldo institucional y desbloquea recursos, campeón técnico BIM con conocimiento sólido de metodología BIM actual de la empresa que liderará integración técnica de IA, coordinador de implementación dedicado parcialmente a gestión del proyecto piloto incluyendo cronograma y presupuesto, usuarios finales representativos de áreas que usarán la tecnología como residentes de obra o coordinadores BIM para asegurar que solución responde a necesidades reales, y soporte de proveedor tecnológico mediante distribuidor local o fabricante de software que provea capacitación inicial y soporte técnico durante primeros meses críticos. Para MIPYMES con equipos reducidos, algunos roles pueden consolidarse donde campeón técnico puede también ejercer como coordinador de implementación, pero es crítico mantener patrocinador ejecutivo separado que asegure compromiso organizacional de alta dirección.

El resultado de esta fase de diagnóstico y preparación es un documento de evaluación organizacional que consolida madurez BIM actual, necesidades priorizadas con criterios cuantitativos, objetivos SMART específicos, inventario de capacidades y restricciones, y conformación formal de equipo de implementación, constituyendo fundamento para toma de decisión informada sobre qué aplicación IA-BIM implementar en fase siguiente y mediante qué trayectoria específica considerando particularidades de la empresa.

4.3.2 Fase 2: adopción inicial y capacitación

La fase de adopción inicial y capacitación materializa la estrategia definida en fase de diagnóstico mediante implementación de proyecto piloto controlado que minimiza riesgo organizacional mientras genera aprendizajes transferibles a escala posterior (Kotter, 2012). Esta fase comprende seis actividades secuenciales que transitan desde selección tecnológica hasta validación de resultados medibles.

La primera actividad corresponde a selección de aplicación IA-BIM prioritaria mediante matriz de decisión multicriterio que pondera cuatro dimensiones críticas. La dimensión de impacto potencial evalúa beneficio económico esperado mediante retorno de inversión proyectado, urgencia estratégica considerando requisitos contractuales inminentes, y alcance de beneficio distinguiendo si impacta solo área específica o múltiples procesos organizacionales. La dimensión de viabilidad técnica evalúa madurez BIM mínima requerida donde aplicaciones como monitoreo automatizado de avance mediante computer vision requieren solo Etapa 1 mientras gemelos digitales requieren Etapa 3, disponibilidad de datos históricos donde machine learning predictivo requiere cinco a diez proyectos previos documentados, y complejidad de integración con sistemas actuales. La dimensión de recursos requeridos evalúa inversión inicial en licencias y hardware, tiempo de implementación hasta generar valor medible, y necesidad de capacitación intensiva versus curva de aprendizaje suave. La dimensión de riesgo evalúa madurez comercial de la tecnología distinguiendo productos consolidados versus emergentes, disponibilidad de soporte técnico local, y experiencia previa documentada en contexto colombiano o latinoamericano (Saaty, 1980). Para empresas colombianas, el análisis de sección 4.2.2 evidenció que aplicaciones de computer vision para monitoreo de construcción y detección de riesgos de seguridad obtienen puntuaciones más altas en esta matriz por combinar impacto muy alto, viabilidad técnica alta, retorno de inversión rápido y múltiples casos validados en Latinoamérica.

La segunda actividad corresponde a selección de proveedor tecnológico mediante evaluación estructurada que trasciende análisis de características funcionales del software para considerar factores críticos de implementación exitosa. Los criterios de evaluación incluyen presencia y soporte local donde proveedor debe tener distribuidor autorizado en Colombia o región andina que provea capacitación en español y soporte técnico con tiempo de respuesta máximo

veinticuatro horas, casos de éxito documentados en Latinoamérica con métricas cuantificables publicadas que validen efectividad en contexto regional, integración nativa con ecosistema BIM actual de la empresa particularmente Autodesk Revit y BIM 360 que dominan mercado colombiano según sección 4.2.3, modelo de licenciamiento flexible que permita escalar gradualmente desde licencias piloto reducidas hacia despliegue completo sin penalización económica, y período de prueba o garantía de satisfacción que permita validar adecuación al caso de uso específico antes de compromiso contractual de largo plazo (Eastman et al., 2011). La evaluación debe incluir demostración en vivo del software aplicado a datos reales de la empresa, no solo demos genéricos preparados por proveedor, y verificación de referencias contactando directamente empresas similares que hayan implementado la solución.

La tercera actividad corresponde a definición de proyecto piloto estratégico que equilibra representatividad con control de riesgo mediante selección cuidadosa de alcance, duración y equipo participante (Yin, 2018). El proyecto piloto debe ser representativo del tipo de proyectos habituales de la empresa en términos de complejidad, tamaño y tipología constructiva para que aprendizajes sean transferibles, pero suficientemente acotado en alcance y duración para permitir iteración rápida y corrección de problemas sin comprometer proyectos críticos para la empresa. La duración recomendada es tres a seis meses que permite capturar ciclo completo de implementación, capacitación, uso operativo y evaluación de resultados, evitando pilotos excesivamente largos que pierden momentum o excesivamente cortos que no permiten maduración de curva de aprendizaje. El equipo piloto debe incluir usuarios entusiastas caracterizados por Rogers (2003) como innovadores o adoptadores tempranos que tienen mayor apertura al cambio y tolerancia a problemas iniciales de la tecnología, evitando incluir en piloto inicial a usuarios escépticos o resistentes que pueden contaminar percepción organizacional con experiencias

negativas amplificadas. La comunicación del piloto a la organización debe balancear transparencia con gestión de expectativas, explicando que se trata de fase experimental donde se esperan problemas y ajustes, evitando generar expectativa de solución perfecta que inevitablemente generará frustración.

La cuarta actividad corresponde a capacitación estructurada del equipo piloto mediante programa que combina formación conceptual, práctica supervisada y soporte continuo durante fase de adopción. La capacitación inicial debe abarcar fundamentos conceptuales de la técnica de IA empleada explicando en términos accesibles cómo funciona el algoritmo para generar confianza y comprensión versus percepción de caja negra misteriosa, flujo de trabajo completo desde preparación de datos hasta interpretación de resultados enfatizando puntos críticos donde intervención humana es necesaria, y práctica supervisada con datos reales del proyecto piloto bajo supervisión de instructor experto que corrige errores y responde preguntas en tiempo real (Bloom, 1984). La capacitación no debe limitarse a sesión inicial intensiva de dos o tres días que típicamente resulta en retención limitada, sino estructurarse mediante modelo de aprendizaje distribuido con sesiones semanales cortas de una a dos horas durante primer mes que refuerzan conocimientos mediante práctica repetida y permiten resolver problemas emergentes cuando surgen en contexto operativo real. El proveedor tecnológico debe proveer materiales de capacitación en español incluyendo videos tutoriales, guías de referencia rápida y casos de uso documentados que usuarios puedan consultar autónomamente cuando enfrentan situaciones nuevas.

La quinta actividad corresponde a implementación operativa del piloto con monitoreo continuo de métricas de adopción y desempeño que permiten detección temprana de problemas y ajustes correctivos oportunos. Las métricas de adopción evalúan frecuencia de uso real del sistema

distinguiendo entre acceso ocasional y uso sistemático integrado al flujo de trabajo habitual, porcentaje de usuarios capacitados que efectivamente utilizan la herramienta versus aquellos que después de capacitación inicial abandonan su uso, y tiempo promedio de uso semanal que indica si herramienta se integró como rutina operativa o permanece como actividad periférica opcional (Venkatesh et al., 2003). Las métricas de desempeño técnico evalúan precisión de resultados generados por IA comparando contra verificación manual en muestra aleatoria de casos para detectar problemas de calidad, tiempo de procesamiento que debe ser compatible con restricciones operativas del proyecto, y tasa de errores o fallas técnicas que requieren intervención de soporte. Las métricas de impacto operativo evalúan cambio cuantificable en tiempo dedicado a actividad específica comparando línea base pre-implementación contra desempeño durante piloto, calidad de decisiones tomadas con apoyo de IA medida mediante indicadores relevantes como reducción de accidentes o desviaciones de cronograma, y percepción subjetiva de utilidad por usuarios mediante encuestas de satisfacción estructuradas (Sauro y Lewis, 2016). El monitoreo debe documentarse semanalmente en bitácora de implementación que registra problemas encontrados, soluciones aplicadas y lecciones aprendidas que informarán escalamiento posterior.

La sexta actividad corresponde a evaluación formal de resultados del piloto mediante comparación sistemática de métricas objetivo contra desempeño real, generando recomendación fundamentada sobre continuar hacia escalamiento, ajustar estrategia o discontinuar implementación si resultados son insatisfactorios (Kotter, 2012). La evaluación debe comparar beneficios cuantificables obtenidos contra inversión realizada calculando retorno de inversión real del piloto, comparar tiempo de implementación real contra estimación inicial identificando factores que causaron desviaciones para mejorar planificación de escalamiento, documentar lecciones aprendidas tanto exitosas como fallidas que constituyen conocimiento organizacional

valioso, y generar casos de uso documentados con métricas específicas que pueden comunicarse al resto de la organización para generar legitimación social de la tecnología. Si resultados del piloto son satisfactorios cumpliendo al menos setenta por ciento de objetivos SMART definidos en fase uno, se autoriza transición a fase tres de integración avanzada y escalamiento, mientras que si resultados son parciales cumpliendo cuarenta a setenta por ciento de objetivos se recomienda iteración con ajustes antes de escalar, y si resultados son insatisfactorios cumpliendo menos de cuarenta por ciento se recomienda reevaluación fundamental de aplicación seleccionada o proveedor tecnológico antes de continuar inversión.

Tabla 9. *Indicadores de verificación y métricas de éxito del piloto de adopción IA-BIM*

Indicador	Descripción	Unidad de medida	Meta recomendada	Frecuencia de medición
% de personal capacitado	Participantes que completaron la capacitación sobre IA-BIM y BIM básico	Porcentaje	$\geq 85\%$	Al cierre del programa de capacitación
Frecuencia de uso	Veces que la herramienta/Proceso IA-BIM es utilizada en el flujo real de trabajo	Uso semanal	$\geq 70\%$ del equipo técnico	Semanal
Precisión técnica	Reducción de tiempo de ejecución de la tarea vs método tradicional	Porcentaje de aciertos	$\geq 80\%$	Mensual (muestra aleatoria de casos)
Tiempo de procesamiento	Reducción de tiempo de ejecución de la tarea vs método tradicional	Horas/ minutos/ porcentaje	$\geq 30\%$ reducción	Al comparar antes/después
Satisfacción de usuarios	Valoración de utilidad y facilidad de uso por los participantes (encuesta estructurada)	Puntuación (1-5)	≥ 4 (en escala 1-5)	Final de piloto y trimestral
Retención post-capacitación	Porcentaje de usuarios que siguen utilizando la tecnología tras 1-3 meses	Porcentaje	$\geq 75\%$	Mensual tras fin de capacitación
Retorno de inversión (ROI)	Cálculo preliminar del ahorro/costos evitados vs inversión	COP/ Porcentaje	$\geq 15\%$ ROI	Al cierre del piloto

El resultado de esta fase de adopción inicial y capacitación es validación empírica de viabilidad de integración IA-BIM en contexto específico de la empresa, equipo capacitado con experiencia práctica operativa, documentación de lecciones aprendidas que reduce riesgo de

escalamiento, y casos de éxito internos documentados que facilitan cambio cultural organizacional hacia adopción más amplia en fase siguiente.

4.3.3 Fase 3: integración avanzada y gestión normativa

La fase de integración avanzada y gestión normativa escala los aprendizajes del piloto exitoso hacia despliegue organizacional amplio, mientras asegura cumplimiento del marco regulatorio colombiano que condiciona implementaciones tecnológicas en construcción (MinTIC, 2020). Esta fase comprende cinco actividades interdependientes que transitan desde escalamiento técnico hasta institucionalización de cambio organizacional.

La primera actividad corresponde a escalamiento planificado de la solución IA-BIM desde proyecto piloto hacia múltiples proyectos o áreas organizacionales mediante estrategia gradual que minimiza disrupciones operativas. El escalamiento debe priorizarse según criterios de madurez BIM previa donde proyectos o equipos que ya operan en Etapa 2 de colaboración basada en modelos tienen mayor probabilidad de adopción exitosa que aquellos en Etapa 1, similitud con proyecto piloto donde proyectos de tipología y complejidad similar al piloto exitoso reducen curva de aprendizaje y reutilizan configuraciones técnicas validadas, y disponibilidad de campeones locales donde cada nuevo proyecto debe tener al menos un usuario del equipo piloto que transfiera conocimiento operativo a nuevos usuarios (Rogers, 2003). La velocidad de escalamiento debe calibrarse según capacidad de absorción organizacional, donde empresas grandes con equipos dedicados pueden escalar más rápidamente incorporando dos a tres proyectos nuevos trimestralmente, mientras MIPYMES con equipos reducidos deben escalar más conservadoramente incorporando un proyecto nuevo semestral para no saturar capacidad de soporte interno. El escalamiento debe acompañarse de expansión proporcional de licencias de

software evitando compartir licencias individuales entre múltiples usuarios que genera cuellos de botella y frustración, y ampliación del equipo de soporte interno mediante certificación de usuarios avanzados del piloto como capacitadores internos que reducen dependencia de soporte externo costoso (Bloom, 1984).

La segunda actividad corresponde a alineación con Estrategia Nacional BIM 2020-2026 que establece hoja de ruta sectorial de transformación digital con obligatoriedad BIM en proyectos de infraestructura pública a partir de dos mil veintiséis (MinTIC, 2020). La estrategia nacional define estándares mínimos de entregables BIM incluyendo nivel de desarrollo de objetos LOD 350 para construcción y LOD 500 para as-built, protocolos de intercambio de información basados en estándar internacional ISO 19650, y requisitos de interoperabilidad mediante formatos abiertos IFC para garantizar acceso a información independiente de software propietario. Las empresas deben evaluar brechas entre implementación IA-BIM actual y requisitos de estrategia nacional, identificando áreas donde integración IA puede facilitar cumplimiento normativo como generación automatizada de modelos as-built mediante fotogrametría que cumple requisito de actualización post-construcción, verificación automática de cumplimiento normativo mediante algoritmos que validan contra NSR-10 y códigos locales reduciendo tiempo de aprobación de licencias, y trazabilidad de cambios mediante sistemas de gestión de información que documentan evolución del proyecto cumpliendo requisitos de transparencia en obra pública. La implementación debe anticipar obligatoriedad dos mil veintiséis desarrollando capacidades con dos años de antelación que permiten participar competitivamente en licitaciones públicas que progresivamente exigen capacidades BIM avanzadas como criterio de calificación (Succar, 2009).

La tercera actividad corresponde a cumplimiento de Ley 1581 de 2012 sobre protección de datos personales que regula tratamiento de información personal generada por sistemas IA-BIM

particularmente aquellos basados en computer vision y sensores IoT (Congreso de Colombia, 2012). Las aplicaciones de computer vision para monitoreo de obra capturan imágenes y videos que pueden contener rostros identificables de trabajadores, vehículos con placas visibles y otros datos personales que califican como información protegida bajo normativa colombiana. Las aplicaciones de sensores de ocupación mediante Internet de las Cosas para análisis de uso de espacios generan datos de ubicación y patrones de movimiento de usuarios que constituyen datos personales sensibles. El cumplimiento requiere implementación de cinco medidas obligatorias donde política de privacidad debe informar explícitamente qué datos se capturan, con qué propósito específico, quién tiene acceso, durante cuánto tiempo se almacenan y cómo ejercer derechos de acceso y rectificación. El consentimiento informado debe obtenerse de trabajadores y usuarios antes de activar sistemas de captura, explicando en lenguaje claro no técnico qué información se recolecta y cómo se utiliza, documentando aceptación mediante firma física o electrónica que constituye evidencia legal de autorización. Las medidas de seguridad técnica deben implementar encriptación de datos en tránsito y reposo, control de acceso basado en roles limitando visualización de información solo a personal autorizado, y anonimización de datos cuando análisis agregado no requiere identificación individual como mapas de calor de ocupación que pueden generarse sin asociar datos a personas específicas. El registro ante Superintendencia de Industria y Comercio debe completarse si empresa almacena bases de datos con información personal de más de mil registros, cumpliendo obligación de inscripción en Registro Nacional de Bases de Datos. La evaluación de impacto de privacidad debe realizarse para aplicaciones de alto riesgo como monitoreo continuo mediante cámaras, documentando análisis de proporcionalidad entre beneficio operativo y afectación de privacidad, mitigaciones implementadas y aprobación de

oficial de protección de datos o asesor jurídico especializado (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2013).

La cuarta actividad corresponde a aplicación de Ley 842 de 2003 sobre ejercicio de ingeniería y profesiones afines que establece responsabilidad profesional de ingenieros y arquitectos en diseño y construcción (Congreso de Colombia, 2003). La integración de IA en procesos de diseño y construcción genera preguntas sobre asignación de responsabilidad cuando algoritmos generan recomendaciones que posteriormente resultan erróneas, como diseño generativo que sugiere distribución espacial que luego presenta problemas constructivos no anticipados, predicción de cronogramas mediante machine learning que subestima duración generando compromisos contractuales incumplibles, o detección automática de riesgos de seguridad que falla identificando condición peligrosa resultando en accidente laboral. La posición conservadora jurídicamente sólida establece que profesional responsable debe siempre validar recomendaciones de IA antes de aprobarlas, implementando modelo human-in-the-loop donde IA funciona como asistente de decisión, pero nunca como tomador de decisión autónomo, manteniendo ingeniero o arquitecto como responsable último de diseño y construcción con obligación de verificar razonabilidad de recomendaciones algorítmicas mediante criterio profesional independiente. Los contratos con proveedores de software IA deben especificar explícitamente que herramienta constituye ayuda técnica sin asumir proveedor responsabilidad por decisiones tomadas por usuarios basadas en outputs del sistema, limitando responsabilidad del proveedor a funcionalidad técnica del software según especificaciones documentadas. La documentación de decisiones debe registrar en bitácora de proyecto cuándo se utilizaron recomendaciones de IA, qué validaciones se realizaron, y quién aprobó finalmente la decisión, generando trazabilidad que protege profesional responsable en caso de disputas contractuales o

reclamaciones de responsabilidad civil (Consejo Profesional Nacional de Ingeniería y Arquitectura, 2003).

La quinta actividad corresponde a implementación de interoperabilidad según estándar ISO 19650 sobre gestión de información mediante BIM que establece protocolo internacional de intercambio de datos entre participantes de proyecto (ISO, 2018). El estándar define Plan de Ejecución BIM que documenta qué información se genera en cada fase, en qué formato, con qué nivel de desarrollo, quién es responsable de generarla y validarla, y cómo se intercambia entre disciplinas y organizaciones participantes. La integración IA-BIM debe especificarse en Plan de Ejecución BIM indicando qué procesos incorporan asistencia de IA como generación automatizada de documentación mediante procesamiento de lenguaje natural que extrae información de modelo para producir memorias técnicas, detección de interferencias mediante machine learning que prioriza revisión manual de coordinación, o actualización de modelo as-built mediante fotogrametría que genera modelo tridimensional desde imágenes capturadas. El formato de intercambio debe privilegiar estándares abiertos como IFC para geometría y propiedades de objetos BIM, BCF para comunicación de interferencias y problemas detectados, y COBie para información de activos en fase de operación, evitando dependencia de formatos propietarios que limitan interoperabilidad entre software heterogéneo utilizado por diferentes participantes del proyecto. La validación de calidad de información debe implementar verificaciones automatizadas que confirman completitud de información requerida según especificación contractual, consistencia entre modelos de diferentes disciplinas mediante detección de interferencias, y cumplimiento de convenciones de nomenclatura y clasificación según estándares adoptados organizacionalmente o requeridos contractualmente (Eastman et al., 2011).

Tabla 10. *Matriz de cumplimiento normativo y trazabilidad de integración IA-BIM*

Requisito normativo /estandar	Descripción de cumplimiento	Evidencia de trazabilidad	Responsable asignado	Estado: Cumple / No cumple / En proceso
ISO 19650	Documentación de gestión de información BIM	Plan de ejecución BIM actualizado	Coordinador BIM	Cumple / No cumple / En proceso
Ley 842 del 2003	Validación y aprobación profesional técnica	Informe firmado por profesional	Ingeniero / Arquitecto	Cumple / No cumple / En proceso
Ley 1581 del 2012	Consentimiento de tratamientos de datos personales	Formatos de consentimientos archivados	Oficial de privacidad	Cumple / No cumple / En proceso
Estrategia Nacional BIM 2020-2026	Conformidad con etapas de adopción obligatorias	Acta de implementación por etapas	Gerente de proyecto	Cumple / No cumple / En proceso
Interoperabilidad (IFC/COBie/BCF)	Adecuación al intercambio de datos abiertos	Reporte de compatibilidad de software	Coordinador BIM	Cumple / No cumple / En proceso
Responsabilidad contractual	Validación final de outputs de IA antes de uso	Lista de verificación y aprobaciones	Responsable de proyecto	Cumple / No cumple / En proceso

El resultado de esta fase de integración avanzada y gestión normativa es despliegue organizacional amplio de capacidades IA-BIM operando en múltiples proyectos simultáneos, cumplimiento verificado del marco regulatorio colombiano que reduce riesgo legal y habilita participación en licitaciones públicas que progresivamente exigen estas capacidades, y consolidación de cambio cultural donde uso de IA-BIM transita de excepción experimental a práctica estándar institucionalizada en procesos operativos habituales de la empresa.

4.3.4 Fase 4: mejora continua y optimización

La fase de mejora continua y optimización institucionaliza la transformación digital IA-BIM como capacidad organizacional permanente que evoluciona sistemáticamente mediante ciclos de medición, análisis y refinamiento, trascendiendo la implementación tecnológica puntual hacia cultura de innovación sostenida (Deming, 1986). Esta fase comprende cinco actividades recurrentes que aseguran que inversión en IA-BIM genera valor creciente en el tiempo mediante optimización continua de procesos, expansión estratégica de capacidades y actualización tecnológica proactiva.

La primera actividad corresponde a monitoreo sistemático de indicadores clave de desempeño mediante dashboard ejecutivo que consolida métricas técnicas, operativas y financieras actualizadas en tiempo real para facilitar toma de decisiones basada en datos (Kaplan y Norton, 1996). Los indicadores técnicos evalúan confiabilidad del sistema mediante disponibilidad operativa medida como porcentaje de tiempo que plataforma IA-BIM está accesible y funcionando correctamente excluyendo mantenimientos programados donde meta típica es noventa y nueve por ciento mensual, precisión de algoritmos comparando predicciones o detecciones automáticas contra verificación manual en muestra estadística representativa donde degradación progresiva indica necesidad de reentrenamiento de modelos, y tiempo de respuesta del sistema medido desde solicitud de usuario hasta entrega de resultado donde incrementos progresivos sugieren necesidad de optimización de infraestructura o actualización de hardware. Los indicadores operativos evalúan adopción efectiva mediante tasa de utilización medida como porcentaje de proyectos elegibles que efectivamente utilizan herramienta IA-BIM versus aquellos que no la adoptan indicando resistencia residual o barreras operativas no resueltas, frecuencia de uso medida como número promedio de interacciones semanales por usuario activo donde uso esporádico sugiere que herramienta no se integró a flujo de trabajo habitual, y satisfacción de usuarios medida mediante encuestas trimestrales que evalúan percepción de utilidad, facilidad de uso y calidad de soporte técnico según escala Likert de cinco puntos (Venkatesh et al., 2003). Los indicadores financieros evalúan retorno de inversión acumulado comparando beneficios económicos totales generados contra inversión total realizada incluyendo licencias, hardware, capacitación y soporte donde meta típica es alcanzar punto de equilibrio entre doce y veinticuatro meses, costo por transacción calculando inversión total dividida por número de usos o procesos ejecutados con apoyo de IA permitiendo comparación económica contra proceso manual equivalente, y valor económico

generado cuantificando ahorros de tiempo, reducción de errores, prevención de accidentes y otros beneficios traducidos a valor monetario mediante metodologías aceptadas de análisis costo-beneficio.

La segunda actividad corresponde a optimización continua de procesos mediante análisis de desviaciones entre desempeño esperado y real, identificando cuellos de botella y oportunidades de mejora que incrementan eficiencia operativa sin inversión adicional significativa (Hammer y Champy, 1993). El análisis de procesos debe realizarse trimestralmente revisando flujo de trabajo completo desde preparación de datos hasta utilización de resultados, identificando pasos que consumen tiempo desproporcionado, requieren intervención manual repetitiva susceptible de automatización, o generan errores recurrentes indicando problemas de diseño del proceso. Las oportunidades típicas de optimización incluyen automatización de preparación de datos mediante scripts que transforman outputs de software BIM a formato requerido por plataforma IA eliminando conversión manual propensa a errores, integración más profunda con sistemas existentes mediante APIs que permiten flujo automático de información entre plataforma IA-BIM y sistemas de gestión de proyectos, contabilidad o recursos humanos reduciendo duplicación de ingreso de datos, personalización de algoritmos mediante ajuste de parámetros o reentrenamiento con datos históricos acumulados de la empresa que mejora precisión de predicciones o detecciones al reflejar particularidades del contexto organizacional específico, y simplificación de interfaces eliminando funcionalidades complejas raramente utilizadas que confunden usuarios y enfocando capacitación en características de mayor valor práctico (Nielsen, 1994). La implementación de mejoras debe seguir ciclo Plan-Do-Check-Act donde cambio propuesto se documenta con justificación y resultado esperado, se implementa en escala reducida o proyecto piloto individual,

se evalúa impacto mediante comparación de métricas antes y después, y se escala a toda la organización solo si validación confirma beneficio neto positivo.

La tercera actividad corresponde a expansión estratégica de capacidades IA-BIM hacia nuevas aplicaciones o fases del ciclo de vida del proyecto aprovechando infraestructura técnica y conocimiento organizacional acumulado que reduce significativamente curva de aprendizaje de adopciones subsecuentes (Rogers, 2003). La estrategia de expansión debe priorizar aplicaciones complementarias que reutilizan datos ya capturados o infraestructura existente maximizando sinergia, como empresa que implementó computer vision para monitoreo de avance puede expandir naturalmente hacia detección de riesgos de seguridad reutilizando mismas cámaras y captura de imágenes pero aplicando algoritmos diferentes, o empresa que implementó machine learning predictivo para cronogramas puede expandir hacia predicción de costos reutilizando motor analítico pero con diferentes variables de entrada y salida. La expansión debe también considerar integración vertical del ciclo de vida donde empresa que dominó aplicaciones IA en fase de construcción puede expandir hacia fase de operación mediante mantenimiento predictivo o gemelos digitales que aprovechan modelo as-built actualizado generado durante construcción, o hacia fase de diseño mediante diseño generativo o revisión automática de cumplimiento normativo que fortalece capacidades técnicas en etapas tempranas del proyecto (Eastman et al., 2011). La decisión de expansión debe evaluarse mediante misma matriz de priorización utilizada en fase dos considerando impacto potencial, viabilidad técnica, recursos requeridos y riesgo, pero con ventaja de que empresa ahora tiene mayor madurez organizacional, equipo capacitado experimentado y casos de éxito internos documentados que reducen significativamente barreras de adopción respecto a implementación inicial.

La cuarta actividad corresponde a actualización tecnológica proactiva que mantiene plataformas IA-BIM alineadas con evolución acelerada del estado del arte en inteligencia artificial y construction technology, evitando obsolescencia técnica que reduce competitividad organizacional (Christensen, 1997). La actualización comprende tres dimensiones donde actualizaciones de software deben aplicarse sistemáticamente instalando versiones nuevas liberadas por proveedores que típicamente incluyen mejoras de precisión de algoritmos mediante modelos más avanzados, nuevas funcionalidades solicitadas por comunidad de usuarios, corrección de errores detectados en versiones anteriores, y mejoras de seguridad que protegen contra vulnerabilidades cibernéticas emergentes. Las actualizaciones deben evaluarse en ambiente de prueba antes de desplegar en producción para verificar compatibilidad con configuraciones específicas de la empresa y evitar interrupciones operativas por incompatibilidades no anticipadas. La evaluación de tecnologías emergentes debe realizarse anualmente mediante revisión estructurada de conferencias especializadas como AECO Innovation Summit, publicaciones académicas en journals como Automation in Construction, y reportes de consultoras como McKinsey o Dodge Data & Analytics, identificando tecnologías disruptivas que podrían transformar procesos críticos como modelos de lenguaje grandes aplicados a análisis de documentación contractual, realidad aumentada integrada con BIM para visualización en campo, o blockchain para trazabilidad de cadena de suministro de materiales (Gerbert et al., 2016). La decisión de adoptar tecnologías emergentes debe balancear potencial de ventaja competitiva temprana contra riesgo de invertir en tecnologías inmaduras que pueden no consolidarse comercialmente, privilegiando adopción temprana solo cuando empresa tiene capacidad de absorber riesgo de implementación fallida. El mantenimiento de infraestructura debe programarse preventivamente actualizando hardware cuando capacidad de procesamiento se satura

consistentemente degradando experiencia de usuario, ampliando almacenamiento cuando capacidad disponible cae bajo veinte por ciento del total indicando riesgo inminente de saturación, y renovando equipos de captura como cámaras o drones cuando haya desgaste físico u obsolescencia tecnológica comprometen calidad de datos capturados.

La quinta actividad corresponde a institucionalización de cultura de innovación continua que transforma adopción IA-BIM de iniciativa puntual de transformación hacia mentalidad organizacional permanente de experimentación, aprendizaje y mejora (Schein, 2010). La institucionalización requiere formalización de proceso de innovación mediante comité de innovación tecnológica que se reúne trimestralmente evaluando propuestas de nuevas tecnologías, priorizando experimentos a realizar y revisando resultados de pilotos en curso, con participación de representantes de diferentes áreas técnicas y operativas que aseguran diversidad de perspectivas. El presupuesto de innovación debe asignarse explícitamente reservando uno a tres por ciento de ingresos anuales para experimentación con tecnologías emergentes, protegiendo esta inversión de recortes presupuestarios reactivos durante períodos de contracción económica que típicamente eliminan primero actividades de innovación sacrificando competitividad de largo plazo por supervivencia de corto plazo. El reconocimiento de innovadores debe implementarse mediante premios anuales que reconocen públicamente contribuciones individuales o de equipo a mejora de procesos mediante tecnología, casos de éxito en implementación de nuevas herramientas, o propuestas creativas que resolvieron problemas operativos significativos, reforzando comportamiento innovador mediante incentivos tangibles e intangibles (Amabile, 1998). El intercambio de conocimiento debe facilitarse mediante comunidades de práctica internas donde usuarios avanzados de diferentes proyectos comparten tips, trucos y lecciones aprendidas en sesiones mensuales presenciales o virtuales, documentación de casos de uso en wiki interna

accesible a toda la organización que permite consulta autónoma de soluciones a problemas comunes, y participación en comunidades externas como BIM Forum Colombia o grupos de usuarios de software específico que exponen equipo interno a mejores prácticas sectoriales y tendencias emergentes más allá de frontera organizacional.

Tabla 11. *Dashboard de indicadores clave de desempeño (KPI) para IA-BIM*

Indicador KPI	Descripción	Unidad de medida	Meta óptima	Frecuencia de actualización	Responsable
Disponibilidad operativa	% de tiempo que el sistema IA-BIM está accesible y funcional	Porcentaje	$\geq 99\%$ mensual	Mensual	Soporte técnico
Precisión de algoritmos	Comparativo entre predicciones automáticas y verificación manual	Porcentaje de aciertos	$\geq 85\%$	Mensual / muestra trimestral	Analista IA
Tiempo de respuesta	% de proyectos o equipos que usan IA-BIM sobre elegibles	Porcentaje	$\geq 80\%$	Trimestral	Gerencia técnica
Frecuencia de uso	Número promedio de interacciones por usuario activo mensual	Veces - semana	≥ 5	Semanal	Coordinador BIM
Satisfacción de usuarios	Encuestas estructuradas sobre utilidad y soporte	Puntuación (1-5)	≥ 4	Trimestral	RRHH
ROI acumulados	Retorno de inversión global del sistema IA-BIM	COP/ Porcentaje	$\geq 20\%$ anual	Anual	Dirección financiera
Casos de mejora implementados	Número de propuestas de optimización aceptadas por comité	Número	≥ 2 por trimestre	Trimestral	Comité de innovación

El resultado de esta fase de mejora continua y optimización es transformación profunda de capacidad organizacional donde empresa no solo utiliza IA-BIM sino domina estas tecnologías extrayendo valor creciente mediante refinamiento sistemático, expande estratégicamente capacidades hacia nuevas aplicaciones y fases del proyecto consolidando ventaja competitiva sostenible, y cultiva mentalidad de innovación continua que asegura relevancia organizacional frente a evolución tecnológica acelerada que caracteriza industria de construcción contemporánea.

4.3.5 Herramientas de decisión y evaluación

Las herramientas de decisión y evaluación constituyen instrumentos operativos que traducen el conocimiento taxonómico desarrollado en secciones anteriores en mecanismos estructurados de toma de decisiones, permitiendo a empresas con diferentes perfiles y niveles de madurez seleccionar objetivamente qué aplicaciones IA-BIM implementar, en qué secuencia, y mediante qué proveedor tecnológico (Saaty, 1980). Este componente de la guía comprende tres herramientas complementarias que abordan decisiones críticas en distintas etapas del proceso de implementación.

La primera herramienta corresponde a Matriz de Priorización de Aplicaciones IA-BIM que sistematiza evaluación multicriterio de quince aplicaciones identificadas en sección 4.2 mediante ponderación cuantitativa de cuatro dimensiones estratégicas. La dimensión de impacto potencial con peso de treinta por ciento evalúa beneficio económico esperado mediante calificación de uno a cinco donde cinco representa retorno de inversión superior a doscientos por ciento documentado en casos latinoamericanos como OpenSpace y TestFit, urgencia estratégica donde cinco representa requisito contractual o regulatorio inminente como obligatoriedad BIM en obra pública dos mil veintiséis, y alcance organizacional donde cinco representa impacto transversal en múltiples procesos versus uno que impacta solo área específica aislada. La dimensión de viabilidad técnica con peso de veinticinco por ciento evalúa madurez BIM requerida donde cinco representa aplicaciones accesibles desde Etapa 1 como computer vision para monitoreo de obra versus uno que requiere Etapa 3 consolidada como gemelos digitales operacionales, disponibilidad de datos donde cinco representa aplicaciones que operan con datos generados en tiempo real sin requerir históricos versus uno que requiere diez o más proyectos históricos documentados sistemáticamente, y complejidad de integración donde cinco representa integración nativa con ecosistema Autodesk dominante en Colombia versus uno que requiere desarrollo customizado

complejo. La dimensión de recursos requeridos con peso de veinticinco por ciento evalúa inversión inicial donde cinco representa inversión inferior a cinco mil dólares accesible para MIPYMES versus uno que requiere inversión superior a cincuenta mil dólares, tiempo hasta generar valor donde cinco representa beneficio cuantificable en semanas versus uno que requiere más de doce meses, e intensidad de capacitación donde cinco representa curva de aprendizaje suave con una semana de capacitación versus uno que requiere dos meses de formación intensiva. La dimensión de riesgo con peso de veinte por ciento evalúa madurez comercial donde cinco representa productos consolidados con más de quinientos clientes globales versus uno que representa tecnología emergente en fase beta, soporte local donde cinco representa distribuidor certificado en Colombia con casos documentados versus uno sin presencia regional, y casos latinoamericanos donde cinco representa cinco o más implementaciones documentadas con métricas versus uno sin casos regionales validados (Saaty, 1980).

La aplicación de esta matriz mediante calificación de cada criterio en escala uno a cinco y ponderación según pesos establecidos genera puntuación total entre cero y quinientos puntos que permite ranking objetivo de aplicaciones. El análisis de sensibilidad debe realizarse variando pesos de dimensiones según prioridades específicas de empresa donde empresa con restricción presupuestaria severa puede incrementar peso de recursos requeridos a cuarenta por ciento reduciendo proporcionalmente otros, mientras empresa grande con capacidad de inversión puede privilegiar impacto potencial con cuarenta y cinco por ciento aceptando mayor complejidad de implementación. Los resultados típicos para contexto colombiano según análisis de sección 4.2 ubican en primeros lugares a computer vision para monitoreo de construcción con cuatrocientos veinte puntos por combinar impacto muy alto, viabilidad técnica alta, inversión moderada y múltiples casos LATAM, computer vision para detección de riesgos de seguridad con

cuatrocientos diez puntos por impacto social crítico y retorno de inversión documentado de ciento cincuenta a doscientos cincuenta por ciento, y procesamiento de lenguaje natural para generación automática de documentación con trescientos noventa puntos por reducción documentada de sesenta a ochenta por ciento en tiempo de documentación técnica. En posiciones intermedias se ubican machine learning para predicción de cronogramas con trescientos veinte puntos limitado por requerimiento de datos históricos, y diseño generativo para layouts con trescientos diez puntos limitado a nicho de desarrolladores inmobiliarios. En posiciones inferiores se ubican gemelos digitales operacionales con doscientos cuarenta puntos por requerir Etapa 3 implementada en menos de cinco por ciento del sector, y mantenimiento predictivo con doscientos veinte puntos por aplicabilidad limitada a infraestructura crítica de nicho específico (Matthews et al., 2015).

Tabla 12. *Matriz de priorización multicriterio de aplicaciones IA-BIM (ejemplo)*

Alternativa IA-BIM	Impacto potencial (30%)	Viabilidad técnica (25%)	Recursos requeridos (25%)	Riesgo (20%)	Puntaje total	Ranking recomendado
Monitoreo avance obra computer vision	5	4	4	4	4,25	1
Detección de riesgos de seguridad CV	5	4	4	4	4,25	2
Generación automática de documentación NLP	5	4	3	3	3,75	3
Predicción de cronogramas ML	4	3	3	2	3	4
Diseño generativo	4	3	2	2	2,75	5
Gemelos digitales operacionales	3	2	1	1	1,75	6
Mantenimiento predictivo	3	1	1	1	1,5	7

La segunda herramienta corresponde a Checklist de Madurez Organizacional que evalúa capacidad de absorción tecnológica de empresa mediante verificación sistemática de prerrequisitos técnicos, organizacionales y culturales necesarios para implementación exitosa de IA-BIM (Cohen

y Levinthal, 1990). El checklist estructura evaluación en cinco dimensiones críticas donde cada dimensión contiene entre cinco y ocho criterios verificables mediante evidencia objetiva. La dimensión de madurez BIM con peso crítico evalúa si empresa utiliza software BIM para modelado tridimensional en al menos setenta por ciento de proyectos nuevos, si modelos BIM contienen información estructurada de componentes más allá de geometría incluyendo propiedades de materiales y especificaciones técnicas, si existe coordinación interdisciplinaria sistemática entre arquitectura, estructura e instalaciones mediante detección de interferencias, si empresa ha implementado estándares de nomenclatura y organización de modelos aplicados consistentemente en proyectos, y si al menos treinta por ciento del equipo técnico tiene certificación formal en software BIM o experiencia documentada superior a dos años. La dimensión de infraestructura tecnológica evalúa si empresa dispone de estaciones de trabajo con procesadores de octava generación o superior y mínimo dieciséis gigabytes de memoria RAM suficientes para ejecutar algoritmos computacionalmente intensivos, si conectividad a internet tiene velocidad mínima de cincuenta megabits por segundo de descarga permitiendo uso fluido de plataformas en nube, si existe servidor centralizado o almacenamiento en nube para repositorio común de modelos BIM accesible por equipo distribuido, y si licencias de software BIM están actualizadas a versiones de últimos dos años que soportan integraciones con plataformas IA emergentes. La dimensión de capacidad de equipo evalúa si empresa cuenta con al menos un profesional con perfil técnico avanzado que pueda ejercer rol de campeón BIM liderando integración técnica, si equipo tiene disponibilidad de tiempo para dedicar mínimo diez horas semanales durante fase piloto de tres meses sin comprometer proyectos críticos en ejecución, si existe historial de adopción tecnológica previa exitosa que demuestra capacidad de cambio organizacional, y si rotación de personal técnico es inferior a veinte por ciento anual permitiendo

consolidación de conocimiento organizacional versus fuga constante de capacidades (Bloom, 1984).

La dimensión de recursos financieros evalúa si empresa tiene presupuesto aprobado para inversión en tecnología de al menos uno por ciento de ingresos anuales que permita financiar licencias, hardware y capacitación, si existe disposición de gerencia para aprobar inversión adicional no presupuestada si proyecto piloto demuestra retorno de inversión superior a cien por ciento, y si empresa tiene acceso a líneas de crédito o financiamiento para tecnología que faciliten inversión inicial sin comprometer flujo de caja operativo. La dimensión de cultura organizacional evalúa si liderazgo ejecutivo ha comunicado explícitamente compromiso con transformación digital como prioridad estratégica, si existen incentivos formales o informales para profesionales que proponen e implementan mejoras de procesos mediante tecnología, si empresa tiene tolerancia documentada a experimentación permitiendo fallas en proyectos piloto sin sanciones punitivas que inhiben innovación, y si comunicación interna fluye efectivamente entre niveles jerárquicos permitiendo que propuestas de base técnica lleguen a decisores con poder de asignación de recursos (Schein, 2010). La aplicación del checklist mediante verificación de cada criterio con evidencia objetiva genera perfil de madurez organizacional que identifica fortalezas a aprovechar y brechas críticas que deben cerrarse antes de iniciar implementación IA-BIM, donde empresa que cumple menos de sesenta por ciento de criterios debe priorizar fortalecimiento de capacidades BIM base antes de intentar integración IA que tiene alta probabilidad de fracaso por fundamentos insuficientes.

Tabla 13. *Checklist de madurez organizacional para absorción tecnológica (ejemplo)*

Dimensión evaluada	Indicador de madurez	Nivel actual (1-5)	Evidencia	Responsable	Recomendación de mejora
Liderazgo	Compromiso directivo con transformación digital	3	Actas de junta / presupuesto asignado	Gerente general	Socializar estrategia, designar líder
Estrategia digital	Plan formal de adopción tecnológica	2	Documento vigente	Dirección técnica	Actualizar y divulgar
Competencias técnicas	Personal capacitado en IA-BIM	2	Encuesta internos	Dirección de proyectos	Capacitar personal
Infraestructura tecnológica	Recursos informáticos compatibles con IA.BIM	4	Inventario IT / actualizaciones	BIM Manager	Reinvertir en equipos / software
Procesos documentados	Existencia de manuales y flujos para IA-BIM	2	Lista de procedimientos	Coordinador BIM	Elaborar manuales
Gestión de datos	Políticas de seguridad y manejo de datos personales	2	Políticas internas / Formatos de autorización	Legal/ Privacidad	Capacitar y actualizar documentos
Monitoreo de resultados	Seguimiento sistemático a KPIs y retorno	2	Reporte de indicadores	Dirección financiera	Crear dashboard formal
Gestión del cambio	Estrategias para mitigar la resistencia	2	Plan de gestión del cambio	Consultor externo / RRHH	Capacitación y talleres

La tercera herramienta corresponde a Criterios de Selección de Proveedor Tecnológico que estructura evaluación comparativa de plataformas comerciales alternativas que implementan aplicación IA-BIM priorizada, trascendiendo análisis superficial de características funcionales hacia evaluación holística de factores críticos de éxito de implementación. Los criterios técnicos evalúan funcionalidad del software verificando mediante demostración en vivo con datos reales de empresa que plataforma ejecuta casos de uso específicos requeridos, precisión de algoritmos documentada mediante métricas cuantitativas en papers académicos o casos de estudio publicados donde computer vision debe demostrar precisión superior a noventa por ciento y machine learning debe documentar error medio absoluto inferior a quince por ciento, integración con ecosistema BIM actual verificando existencia de plugins oficiales para Revit o Navisworks o soporte nativo de estándares IFC que permitan flujo de información bidireccional sin conversiones manuales propensas a errores, y escalabilidad técnica evaluando si plataforma soporta crecimiento de

volumen de datos y usuarios sin degradación de desempeño mediante arquitectura en nube con elasticidad automática. Los criterios comerciales evalúan modelo de licenciamiento verificando flexibilidad para escalar desde dos o tres licencias piloto hacia veinte o más licencias de despliegue completo sin recompra o penalizaciones económicas desproporcionadas, costo total de propiedad calculando no solo licencias sino costos ocultos de hardware adicional, almacenamiento en nube, capacitación y soporte técnico anual proyectado a tres años, y condiciones contractuales verificando período de prueba mínimo treinta días con garantía de devolución si plataforma no cumple expectativas, cláusulas de actualización automática a versiones nuevas sin costo adicional, y términos de terminación que no imponen penalidades excesivas si empresa decide discontinuar uso (Eastman et al., 2011).

Los criterios de soporte evalúan disponibilidad de distribuidor certificado en Colombia o país vecino que provea capacitación presencial en español y soporte técnico en zona horaria compatible, tiempo de respuesta a incidentes críticos documentado en acuerdo de nivel de servicio donde máximo aceptable es veinticuatro horas para problemas que bloquean operación, calidad de documentación verificando existencia de manuales de usuario en español, videos tutoriales actualizados y base de conocimiento con casos de uso documentados, y comunidad de usuarios activa en región que permita intercambio de experiencias y soluciones a problemas comunes mediante foros o grupos de WhatsApp coordinados por distribuidor local. Los criterios de validación evalúan casos de éxito latinoamericanos documentados con métricas cuantificables de retorno de inversión, reducción de tiempos o mejora de calidad publicadas en sitio web de proveedor o papers académicos, referencias verificables de clientes similares en tamaño y tipología de proyectos que puedan contactarse directamente para validar experiencia real versus promesas comerciales de proveedor, y roadmap de producto que demuestre compromiso de proveedor con

evolución continua de plataforma incorporando tecnologías emergentes y feedback de usuarios versus producto estancado tecnológicamente (Rogers, 2003). La aplicación de estos criterios mediante matriz de evaluación que pondera cada dimensión según importancia relativa para empresa específica genera ranking cuantitativo de proveedores alternativos que fundamenta decisión de selección en evidencia objetiva versus intuición o presión comercial de vendedores, donde diferencia de puntuación inferior a diez por ciento sugiere empate técnico que debe resolverse mediante consideración de factores cualitativos como química personal con equipo de soporte o alineación cultural entre organizaciones.

5. Discusiones

La pregunta central de esta investigación fue evaluar el potencial de la IA como "acelerador" de adopción BIM. La evidencia presentada permite afirmar con alta confianza que la IA actúa efectivamente como acelerador, no como sustituto, en tres mecanismos específicos:

Mecanismo 1: reducción de complejidad de entrada

Computer vision automatiza captura y procesamiento de información de campo, eliminando necesidad de que personal de obra domine lectura de modelos BIM 3D. Esto reduce barrera de capacitación de semanas a horas, permitiendo que empresas adopten BIM en construcción sin invertir en desarrollo intensivo de talento.

Mecanismo 2: cierre del ciclo de retroalimentación

Machine learning predictivo conecta datos históricos con planificación futura, generando aprendizaje organizacional que justifica inversión en captura sistemática de información estructurada (esencia de BIM). Empresas que no veían valor en documentar meticulosamente

proyectos ahora lo hacen porque algoritmos convierten datos históricos en predicciones accionables.

Mecanismo 3: generación de valor incremental cuantificable

IA genera beneficios económicos medibles rápidamente (ROI 150-1000% en 6-18 meses según aplicación), mientras que BIM tradicional tiene ROI diferido (18-36 meses). Esta compresión temporal facilita justificación de inversión ante directorios escépticos, removiendo barrera de "temor a inversión con retorno incierto" (54% de empresas).

Sin embargo, la IA requiere BIM como prerequisite para operar: algoritmos necesitan datos estructurados (geometría, propiedades, metadatos) que solo modelos BIM proveen consistentemente. No existe "atajo" mediante IA que evite consolidación de procesos BIM base, refutando narrativa de que IA podría "saltar" fase BIM directamente hacia construcción digital de próxima generación.

La síntesis es que IA y BIM son complementarios y mutuamente reforzantes: BIM provee infraestructura de información que IA requiere, mientras IA genera valor incremental que justifica inversión en BIM. Esta complementariedad define la oportunidad estratégica para Colombia en la ventana 2024-2030 donde convergencia de mandato BIM 2026 con maduración comercial de plataformas IA-BIM crea momento único de transformación sectorial acelerada.

6. Conclusiones

Tras la ejecución de la metodología de investigación, el trabajo de grado concluye afirmativamente la viabilidad y pertinencia de la inteligencia artificial (IA) como un acelerador estratégico en la adopción BIM dentro del sector constructor colombiano, cumpliendo así con el objetivo general. La investigación demostró que la IA no solo optimiza procesos puntuales, sino

que también ofrece un camino escalable y adaptado al nivel de madurez digital del país, mitigando las barreras de implementación que tradicionalmente ralentizan la transición a la metodología BIM. Esta conclusión principal se sustenta en el cumplimiento riguroso de cada uno de los objetivos específicos que estructuraron el estudio.

En respuesta al primer objetivo específico, se logró diagnosticar el estado actual del sector constructor colombiano respecto a la madurez digital y la adopción BIM. Los hallazgos confirman que la mayoría de las empresas se encuentran en un nivel de madurez, caracterizado por la falta de estandarización en los procesos y la escasez de talento humano especializado. Este diagnóstico fue fundamental para contextualizar la propuesta final, pues revela que cualquier solución tecnológica debe ser modular, de bajo requerimiento de infraestructura inicial, y diseñada para demostrar un Retorno de la Inversión (ROI) rápido.

El segundo objetivo específico, enfocado en la identificación y caracterización de aplicaciones IA-BIM, se cumplió mediante una revisión sistemática que catalogó 18 aplicaciones casos de uso exitosos a nivel global. Se concluye que las tecnologías de IA con mayor potencial de aplicación inmediata en el contexto colombiano son *machine learning* para análisis predictivo y la visión por computador para seguimiento de obra. Estas herramientas se concentran principalmente en optimizar las fases de Diseño Conceptual y Gestión de la Cadena de Suministros, y su caracterización detallada proporciona a las empresas una guía práctica para la toma de decisiones tecnológicas basadas en la experiencia internacional.

Finalmente, el tercer objetivo específico se materializó con la propuesta de un Modelo de Implementación IA-BIM, diseñado estratégicamente para el contexto nacional. La propuesta se articula en cuatro fases con el propósito de ofrecer una hoja de ruta clara que prioriza la capacitación especializada del recurso humano y el desarrollo de estándares internos de datos BIM.

Se concluye que, al seguir esta ruta de implementación por etapas, el sector puede integrar la IA de manera sistemática y sostenible, asegurando la coherencia entre la inversión tecnológica y el aumento real de la productividad, lo cual es el principal beneficio de la adopción BIM acelerada.

Referencias

- Allplan. (2024). *Software BIM y eficiencia energética en edificaciones*.
<https://www.allplan.com/es/blog/software-bim-y-eficiencia-energetica-en-edificaciones-proyecto-sato/>
- Andacol. (2024). *Guía de buenas prácticas para el uso de la inteligencia artificial*.
<https://andacol.com/index.php/pub>
- Arkebim. (2025). *Innovaciones tecnológicas en BIM*. Arkebim. <https://arkebim.com/innovaciones-tecnologicas-en-bim/>
- Autodesk. (2023). *Generative Design in Revit*. Autodesk Help & Documentation.
<https://www.autodesk.com/solutions/generative-design/architecture-engineering-construction>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2025). *Relevancia de BIM en proyectos de agua y saneamiento*.
<https://www.iadb.org/es/blog/agua-saneamiento-y-residuos-solidos/building-information-modeling-bim-en-accion-casos-de-exito-en-agua-y-saneamiento>
- Bew, M., y Richards, M. (2008). *BIM Maturity Model*. Constructing Excellence.
- BIM Forum Colombia. (2020). *Estrategia Nacional BIM*. <https://camacol.co/productividad-sectorial/digitalizacion/bim-forum>
- BIM Forum Colombia. (2025). *Plataforma de articulación y gestión del conocimiento para el sector de la construcción*. <https://camacol.co/bimforum/>
- BIM Management. (2021). *BIM: el ahora, normatividad y avance en Colombia*.
<https://bimanagement.co/2021/12/02/bim-el-ahora-normatividad-y-avance-en-colombia/>

- British Standards Institution (BSI). (2022). *Norma ISO 19650 - Gestión de la Información con Building Information Modelling (BIM)*. <https://www.bsigroup.com/es-ES/products-and-services/standards/iso-19650-building-information-modelling-bim/>
- buildingSMART España. (2024). *openBIM: Colaboración sin barreras en la construcción*. <https://www.buildingsmart.es/bim/openbim/>
- Buildots. (2024). *AI-powered construction progress tracking: Annual industry report 2024*. Tel Aviv: Buildots Ltd. <https://buildots.com/blog/construction-in-2024/>
- Camacol Caldas. (2025). *BIM: De la estrategia a la implementación. Casos de éxito en Colombia*. <https://camacolcaldas.com/etn/bim-de-la-estrategia-a-la-implementacion-casos-de-exito-en-colombia/>
- CAMACOL. (2019). *Hoja de Ruta para la Implementación BIM*. <https://camacol.co/descargable/08-hoja-de-ruta-para-la-implementacion-bim>
- CAMACOL. (2023). *Camacol presentó los resultados de la primera gran Encuesta Nacional BIM sobre transformación digital*. CAMACOL Noticias. <https://camacol.co/prensa/noticias/camacol-presento-los-resultados-de-la-primera-gran-encuesta-nacional-bim-sobre>
- CAMACOL. (2024). *Guía de gestión de información BIM. Bim Forum Colombia*. <https://camacol.co/sites/default/files/descargables/Gestion%20de%20la%20Informaci%C3%B3n%20BIM%20V2.pdf>
- CAMACOL. (2025). *Camacol busca medir la transformación digital del país con la Encuesta Nacional BIM 2025*. Construdata. <https://www.construdata.com/noticias/camacol-busca-medir-la-transformacion-digital-del-pais-con-la-encuesta-nacional-bim-2025>

- Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) - BIM Forum Colombia. (2023). *Encuesta Nacional BIM 2023*. Bogotá, Colombia.
<https://camacol.co/actualidad/publicaciones/revista-urbana/conexion-bim/encuesta-nacional-bim-2023>
- Congreso de la República de Colombia. (2003). *Ley 842 de 2003: Código de ética profesional para el ejercicio de la ingeniería*. <https://www.copnia.gov.co/nuestra-entidad/normatividad/ley-842-de-2003>
- ConsultoresIA. (2025). *Fundamentos de aprendizaje supervisado en inteligencia artificial*. <https://consultoresia.com>
- Da Vinci Ingeniería. (2023). *Estrategia BIM: Revolucionando la Construcción en Colombia*. <https://www.davinci.com.co/innovacion/estrategia-bim-en-colombia/>
- DANE. (2024). *Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH): Mercado laboral sector construcción*. Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo>
- DANE. (2025). *Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC)*. Bogotá, Colombia. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indicadores-economicos-alrededor-de-la-construccion>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2019). *Política Nacional para la Transformación Digital e inteligencia artificial (Conpes 3975)*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3975.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). *Estrategia Nacional BIM 2020-2026*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Estrategia-Nacional-BIM-2020-2026.pdf>

- DL ACM. (2025). *Research on the Application of BIM and Digital Twin-Based Artificial Intelligence*. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3747012.3747033>
- Dodge Data y Analytics. (2020). *SmartMarket Report: The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets*. Bedford, MA: Dodge Data & Analytics.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., y Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* (2da ed.). Wiley.
- Editeca. (2023). *Tres grandes casos de éxito recientes con BIM en Colombia*. <https://editeca.com/casos-de-exito-con-metodologia-bim/>
- Editeca. (2025). *Las mejores IAs de Construcción en 2025*. Editeca. <https://editeca.com/mejores-ias-de-construccion-2025/>
- El Colombiano. (2025). *Colombia vira hacia la construcción con inteligencia artificial: así es la apuesta que redefinirá el futuro del sector*. <https://www.elcolombiano.com/negocios/construccion-colombia-inteligencia-artificial-GG29490071>
- Espacio BIM. (2024). *IFC, ¿qué es IFC o Industry Foundation Classes?* <https://www.espaciobim.com/ifc>
- Espacio BIM. (2025). *ISO 19650 Parte 1 y 2, ¿qué es la norma BIM para la gestión de la información?* <https://www.espaciobim.com/iso-19650>
- Estructuras Verticales. (2025). *Tendencias en la Consultoría de Obras para 2025: IA en Auge*. <https://www.estructurasverticales.com/blog/tendencias-consultoria-obras-2025>
- European Data Protection Board (EDPB). (2023). *Directrices 05/2021 sobre la interacción entre la aplicación del RGPD y la colaboración internacional*.

- https://www.edpb.europa.eu/system/files/2023-09/edpb_guidelines_05-2021_interplay_between_the_application_es.pdf
- Fang, Q., Li, H., Luo, X., Ding, L., Rose, T. M., y An, X. (2018). *Computer vision-based real-time monitoring for construction safety and progress tracking*. Engineering, Construction and Architectural Management, 25(7), 852–868.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., y Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Google Cloud. (2025). *¿Qué es el aprendizaje no supervisado?*
<https://cloud.google.com/discover/what-is-unsupervised-learning?hl=es-419>
- IBM. (2024). *¿Qué es MLOps?* <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/mlops>
- IBM. (2025). *¿Qué es Human In The Loop (HITL)?* <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/human-in-the-loop>
- Innovando en la construcción. (2023). *La transformación digital de la construcción en Colombia*.
<https://innovandoenlaconstruccion.com/la-transformacion-digital-de-la-construccion-en-colombia/>
- Kim, G., Kim, K., y Kim, H. (2012). *Cost prediction using machine learning in construction projects*. Journal of Construction Engineering and Management, 138(3), 325–334.
- Maher, M. L., Gero, J. S., y Simmoff, S. J. (1997). *Expert systems in construction*. En M. L. Maher, J. S. Gero, & S. J. Simmoff (Eds.), *Expert Systems for Engineers: Knowledge Representation, Training, and Learning* (pp. 161–188). Computational Mechanics Publications.
- McKinsey & Company. (2020). *The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction>

McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing construction: A route to higher productivity*.

McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>

McKinsey Global Institute. (2018). *Notes from the AI frontier: Modeling the impact of AI on the world economy*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/featured-insights/artificial-intelligence/notes-from-the-ai-frontier-modeling-the-impact-of-ai-on-the-world-economy>

Mesa Ribero, S. T. (2024). *Encuesta Nacional BIM 2023: Resultados y tendencias*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/encuesta-nacional-bim-2023-resultados-y-tendencias-asociaci%C3%B3n-kgsnf/>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). *Resolución 0549 de 2015: Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la Parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a parámetros y lineamientos de construcción sostenible*. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Inventario nacional de infraestructura pública: Diagnóstico y estado de conservación*. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC). (2023). *Estrategia Nacional BIM 2020-2026*. Bogotá, Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Estrategia-Nacional-BIM-2020-2026.pdf>

Na, S., Heo, S., Choi, W., Kim, C., y Whang, S. W. (2023). *Artificial Intelligence (AI)-Based Technology Adoption in the Construction Industry: A Comparative Study of Korea and China*. *Buildings*, 13(10), 2518. <https://doi.org/10.3390/buildings13102518>

OpenSpace. (2023). *Construction progress monitoring: ROI and efficiency gains*. San Francisco: OpenSpace Labs. <https://www.openspace.ai/resources/roi-report>

- PowerData. (2017). *GDPR: Lo que debes saber sobre el reglamento general de protección de datos*. <https://www.powerdata.es/gdpr-proteccion-datos>
- Presidencia de la República de Colombia. (2012). *Ley 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales*. Diario Oficial No. 48.587. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>
- Presidencia de la República, Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y Superintendencia de Industria y Comercio (SIC). (2025). *Marco Ético para la inteligencia artificial en Colombia: CONPES 4144*. <https://blog.arielapp.co/ia-colombia-guia-legal>
- QuillaTV. (2025). *BIM e inteligencia artificial, claves para el futuro de la construcción colombiana*. <https://quillatv.com/bim-inteligencia-artificial-colombia/>
- Retokommerling. (2025). *Las 6 aplicaciones de IA imprescindibles para BIM*. <https://retokommerling.com/ia-bim-aplicaciones-2025>
- Revista Ingeniería Univalle. (2025). *Proyectos preliminares BIM e IA en Colombia*. <https://revistaingenieria.univalle.edu.co>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5ta ed.). Free Press.
- Russell, S. J., y Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4.^a ed.). Pearson.
- Siemens. (2024). *Digital Twin Technology: Transforming Industries*. Siemens Digital Industries Software. <https://www.siemens.com/digital-twin>
- Siemens. (2024). *MindSphere Digital Twin: Predictive maintenance in built assets*. Munich: Siemens AG Digital Industries. <https://www.siemens.com/mindsphere>

- Smith, J. (2022). *Digital transformation in the construction industry: A case study of Ghanaian firms*. Construction Technology Journal, 20(3).
<https://ojs.amhinternational.com/index.php/jeb/article/view/3756>
- Succar, B. (2009). *Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders*. Automation in Construction, 18(3), 357-375.
- Succar, B., y Kassem, M. (2015). *Macro-BIM adoption: Conceptual structures*. Automation in Construction, 57, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018>
- Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.
- The Factory School. (2025). *IA y BIM: Casos reales de aplicación*.
<https://thefactoryschool.com/blog/ia-y-bim-casos-reales/>
- Universidad Nacional de Colombia. (2019). *Análisis de sobre costos en proyectos de construcción en Colombia: Causas y estrategias de mitigación*. Bogotá: Facultad de Ingeniería.
- World Economic Forum. (2016). *Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology*. Geneva: World Economic Forum.
http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction.pdf
- World Economic Forum. (2021). *Construction Technology: Accelerating Digital Transformation*. Geneva: World Economic Forum.
- Yam Ingeniería. (2025). *Construcción 4.0 en Colombia: BIM obligatorio en 85% de proyectos*. <https://yamingenieria.com.co/construccion-40-colombia/>