

FRAMEWORK CIBERFÍSICO Y ORIENTADO A DATOS PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN: DISEÑO Y VALIDACIÓN EN CONTEXTOS REALES

SERGIO ZABALA-VARGAS

<https://orcid.org/0000-0001-5803-1123>

Sergio.zabala@uniminuto.edu

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

MARÍA JAIMES-QUINTANILLA

<https://orcid.org/0009-0000-5735-1379>

Maria.jaimes.q@uniminuto.edu

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

Recibido: 30 de abril del 2026 / Aceptado: 16 de junio del 2026

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2026.n023.8789>

RESUMEN. La industria de la construcción enfrenta desafíos persistentes asociados a la fragmentación de la información, la baja interoperabilidad entre sistemas y la limitada capacidad para gestionar datos en tiempo real, lo que afecta la toma de decisiones en proyectos complejos. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo diseñar y validar un *framework* orientado a integrar tecnologías emergentes y enfoques basados en datos para fortalecer la gestión de proyectos. Esto se realiza a través de un enfoque mixto, en el que se combina una validación cuantitativa mediante el método Delphi con la participación de cinco expertos internacionales y una evaluación cualitativa mediante grupos focales con representantes de treinta y cuatro empresas del sector de la construcción. El *framework* se estructura a partir de una arquitectura multicapa, un flujo de datos continuo y seis dimensiones operativas que articulan la captura, procesamiento, análisis y uso de la información. Los resultados evidencian una alta aceptación del *framework*, con una media global de 4,51 sobre 5,00, un coeficiente de variación promedio de 0,019, un alfa de Cronbach de 0,87 y un coeficiente de Kendall de 0,79, lo que indica un elevado nivel de consenso y confiabilidad. Asimismo, la evaluación cualitativa confirma su aplicabilidad en contextos reales y destaca mejoras en la toma de decisiones, la optimización de recursos y la anticipación de riesgos, aunque se identifican desafíos asociados a la interoperabilidad, la inversión tecnológica y la disponibilidad de talento especializado. Se concluye que el *framework* constituye una propuesta viable para avanzar hacia modelos de gestión más inteligentes, integrados y orientados a datos en el sector construcción.

PALABRAS CLAVES: gestión de proyectos / sector construcción / transformación digital / inteligencia artificial / analítica de datos / *framework*

CYBER-PHYSICAL AND DATA-ORIENTED FRAMEWORK FOR CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT: DESIGN AND VALIDATION IN REAL-WORLD CONTEXTS

ABSTRACT. The construction industry faces persistent challenges associated with information fragmentation, low interoperability between systems, and limited capacity to manage data in real time, which affects decision-making in complex projects. In this context, this study aims to design and validate a framework focused on integrating emerging technologies and data-driven approaches to strengthen project management. The research adopts a mixed-method approach, combining quantitative validation through the Delphi method with the participation of five international experts and qualitative evaluation through focus groups with representatives from 34 construction sector companies. The framework is structured based on a multi-layer architecture, a continuous data flow, and six operational dimensions that articulate data capture, processing, analysis, and use. The results show high acceptance of the framework, with a global mean of 4.51 out of 5.00, an average coefficient of variation of 0.019, a Cronbach's alpha of 0.87, and a Kendall's coefficient of concordance of 0.79, indicating high levels of consensus and reliability. Additionally, the qualitative evaluation confirms its applicability in real contexts, highlighting improvements in decision-making, resource optimization, and risk anticipation, although challenges related to interoperability, technological investment, and availability of specialized talent are identified. It is concluded that the framework represents a viable proposal to advance toward more intelligent, integrated, and data-driven management models in the construction sector.

KEYWORDS: project management / construction sector / digital transformation / artificial intelligence / data analytics / *framework*

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción enfrenta desafíos persistentes asociados a la complejidad operativa, la incertidumbre inherente a los proyectos y la fragmentación de la información entre actores, procesos y tecnologías. Estas condiciones se traducen en desviaciones en costos y cronogramas, así como en limitaciones para gestionar riesgos de manera oportuna y basada en evidencia. Aunque metodologías consolidadas de dirección de proyectos y herramientas digitales como el *building information modeling* (BIM) han mejorado la coordinación y la planificación, su adopción aislada no ha sido suficiente para resolver problemas estructurales de interoperabilidad, integración de datos y analítica en tiempo real (Akbari et al., 2018; Jakobson et al., 2025; Kerzner, 2025; Sacks et al., 2020).

Desde la perspectiva tecnológica, la literatura reciente ha documentado el potencial de diversas herramientas digitales para transformar la gestión de proyectos. En este sentido, la convergencia de tecnologías emergentes, tales como la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (*internet of things*, IoT), el *big data* y los sistemas ciberfísicos (*cyber-physical systems*, CPS), ha abierto nuevas posibilidades para transformar la gestión de proyectos hacia enfoques integrados, dinámicos y orientados a datos. Estas tecnologías permiten capturar información desde el entorno físico, procesarla mediante infraestructuras escalables y analizarla con modelos capaces de identificar patrones, predecir eventos y recomendar acciones. Así, la transición hacia esquemas *data-driven* favorece el paso de prácticas reactivas a modelos predictivos y prescriptivos basados en el análisis continuo de datos (Alotaibi et al., 2024; Alves et al., 2025; Baghalzadeh Shishehgharkhaneh et al., 2022; Cui et al., 2023; Huang et al., 2021; Sivarajah et al., 2024; Zabala-Vargas et al., 2023).

A pesar de estos avances, persisten importantes limitaciones para su implementación integrada en entornos reales, debido a que su incorporación en el sector construcción ha sido fragmentada y desarticulada. En muchos casos, algunas soluciones como BIM, plataformas IoT o herramientas de analítica avanzada se implementan de forma independiente, sin arquitecturas que aseguren interoperabilidad ni flujos de datos que transformen la información en valor estratégico. Esta desconexión limita el aprovechamiento de la digitalización, genera silos de información y dificulta la toma de decisiones informadas (Chathuranga et al., 2023; Wu & AbouRizk, 2023).

Un elemento crítico es la ausencia de *frameworks* técnicos que articulen coherentemente los componentes tecnológicos, metodológicos y operativos necesarios para una gestión inteligente de proyectos. Aunque la literatura reporta avances en áreas específicas, como la aplicación de aprendizaje automático (*machine learning*) para la predicción de riesgos, el uso de drones para monitoreo de obra y la implementación de gemelos digitales, persiste una brecha en la integración de estas capacidades dentro de modelos unificados a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Parsamehr et al., 2023; Shokouhi & Bachari, 2025).

En este contexto, los sistemas ciberfísicos adquieren un papel central cuando permiten la integración en tiempo real de sistemas físicos y digitales mediante el uso de sensores, datos y mecanismos de control inteligente. A través de dispositivos conectados y plataformas de comunicación, estos sistemas facilitan la captura continua de datos desde el entorno de obra, los cuales pueden integrarse con estrategias como BIM y gemelos digitales para generar representaciones dinámicas del estado del proyecto. Esta capacidad mejora la visibilidad, el control y la simulación de escenarios, lo que contribuye a la optimización de recursos y a la anticipación de eventos con mayor precisión. Sin embargo, su implementación requiere arquitecturas robustas que soporten la integración, el procesamiento y la explotación de los datos (Qian et al., 2021; Sacks et al., 2020; Sompolgrunk et al., 2024; Wu & AbouRizk, 2023).

La literatura reciente coincide en que la transformación digital del sector no depende únicamente de la adopción tecnológica, sino de su integración dentro de modelos de gestión articulados. La combinación de inteligencia artificial, *big data* y analítica avanzada ha mostrado impactos positivos en la predicción de riesgos, la optimización de cronogramas y el control de costos, especialmente cuando se integra con metodologías como BIM y entornos de datos conectados. No obstante, estos beneficios se ven limitados en ausencia de estructuras integradoras, lo que reduce el aprovechamiento del valor de los datos (Pan et al., 2022; Wu & AbouRizk, 2023).

Asimismo, se evidencian barreras organizacionales que condicionan la adopción tecnológica, como la baja madurez digital, la resistencia al cambio, la falta de talento especializado y los problemas de interoperabilidad. A ello se suman desafíos asociados a la calidad e integración de los datos, que dificultan el desarrollo de modelos analíticos robustos y escalables. En consecuencia, la evolución hacia modelos inteligentes requiere no solo inversión tecnológica, sino de *frameworks* que articulen arquitectura, datos y procesos para soportar decisiones en tiempo real.

Considerando las brechas identificadas en la literatura y en la práctica profesional, surge la necesidad de propuestas integradoras que articulen la tecnología, los datos y la gestión. En este contexto, el presente estudio propone el diseño y la validación de un *framework* ciberfísico y orientado a datos para la gestión de proyectos de construcción, el cual integra una arquitectura multicapa, un flujo continuo de datos y un conjunto de dimensiones operativas alineadas con el ciclo de vida del proyecto. El enfoque busca superar la fragmentación mediante una propuesta estructurada que conecte capacidades tecnológicas con procesos de gestión.

Finalmente, este artículo se organiza de la siguiente forma: en primer lugar, se presenta el marco conceptual; posteriormente, se presenta el diseño del *framework*, incluyendo la arquitectura, el flujo de datos y las dimensiones; a continuación, se presenta la metodología, que integra la validación cuantitativa mediante método Delphi y la evaluación cualitativa mediante grupos focales; seguidamente, se presentan los resultados y su

integración a través de triangulación metodológica; y, por último, se presentan la discusión, las conclusiones, las limitaciones y líneas futuras de investigación.

METODOLOGÍA

En esta sección se describe el enfoque metodológico utilizado para el diseño, la validación y la ruta de integración de los resultados del *framework* propuesto.

Enfoque y diseño de la investigación

La investigación adopta un enfoque mixto con predominio cuantitativo, orientado al diseño y validación de un *framework* ciberfísico y basado en datos para la gestión de proyectos de construcción. El componente cuantitativo se fundamenta en la aplicación del método Delphi para evaluar la pertinencia del modelo, mientras que el componente cualitativo permite analizar su aplicabilidad en contextos reales mediante grupos focales. Este enfoque integrador permite abordar fenómenos complejos en los que convergen dimensiones tecnológicas y organizacionales (Creswell & Clark, 2017). El diseño metodológico se desarrolla en cuatro fases: conceptualización del modelo, estructuración del *framework*, validación cuantitativa mediante Delphi y validación cualitativa mediante grupo focal. Finalmente, se implementó una estrategia de triangulación metodológica para integrar los resultados y fortalecer la validez del estudio.

Diseño del *framework* CPD-FCPM

En esta sección se revisa el diseño del *framework* propuesto. Debido a que el objetivo principal de la investigación se asocia al diseño y validación de dicho *framework*, se comprende la importancia de justificar su desarrollo como parte de la metodología de construcción del artefacto investigativo. Como eje central del estudio se desarrolló el *framework cyber-physical and data-driven for construction project management* (CPD-FCPM), concebido como un modelo integrador que articula sistemas ciberfísicos, analítica de datos e inteligencia artificial para la gestión de proyectos de construcción. Su propósito es transformar información del entorno físico y digital en conocimiento útil para la toma de decisiones, mediante una arquitectura estructurada, un flujo de datos continuo y su aplicación en distintas fases del ciclo de vida del proyecto. Este enfoque busca mejorar la eficiencia operativa, optimizar recursos, anticipar riesgos y fortalecer la gestión basada en datos en entornos complejos.

El *framework* se compone de tres elementos principales: una arquitectura multi-capa que organiza la captura y procesamiento de datos; un flujo de datos continuo que permite su transformación en conocimiento; y un conjunto de dimensiones operativas que vinculan estas capacidades con el ciclo de vida del proyecto. Adicionalmente, se soporta en un ecosistema de herramientas digitales que facilita su implementación, lo

que garantiza la interoperabilidad y la generación de valor a partir de los datos. En la Figura 1, se presenta un diagrama general que sintetiza el modelo.

Figura 1
Diagrama general del framework CPD-FCPM para la gestión de proyectos



Arquitectura multicapa del framework CPD-FCPM

La arquitectura del CPD-FCPM se concibe como una estructura multicapa que organiza la captura, gestión, análisis y explotación de datos en proyectos de construcción. Este enfoque responde a la necesidad de integrar el entorno físico y digital, lo que facilita la interacción entre tecnologías y procesos. La arquitectura se compone de cuatro niveles interrelacionados que soportan una gestión basada en datos a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Sacks et al., 2020; Sompolgrunk et al., 2024).

En el primer nivel (N1), la infraestructura ciberfísica constituye la base del modelo y se encarga de la captura de datos desde el entorno operativo. Integra sensores IoT, dispositivos inteligentes, maquinaria conectada y sistemas BIM, lo que permite obtener información en tiempo real y en modo *batch*. Su función es garantizar datos confiables y actualizados para el monitoreo continuo y la detección temprana de eventos (Sompolgrunk et al., 2024). El segundo nivel (N2), correspondiente a la gestión e integración de datos, consolida, depura y almacena la información capturada. Incluye procesos de calidad, transformación y normalización que aseguran coherencia e interoperabilidad, además de mecanismos de gobernanza que regulan el acceso y uso de los datos (Sivarajah et al., 2024).

En el tercer nivel (N3), la capa analítica y la inteligencia artificial transforman los datos en conocimiento útil. Se aplican técnicas de analítica descriptiva, predictiva y prescriptiva, apoyadas en modelos de aprendizaje automático que permiten comprender el comportamiento del proyecto, anticipar riesgos y optimizar decisiones (Greeshma & Edayadiyil, 2022). Finalmente, el cuarto nivel (N4), orientado a la aplicación y la toma de decisiones, facilita la interpretación de la información mediante *dashboards*, indicadores y sistemas de soporte. Esta capa permite generar alertas y recomendaciones, lo que fortalece la capacidad de respuesta del proyecto (Sacks et al., 2020).

En conjunto, esta arquitectura garantiza un flujo coherente de información desde su origen hasta su uso estratégico, lo que promueve una gestión integral basada en datos en entornos complejos.

Flujo de datos del framework CPD-FCPM

El flujo de datos del CPD-FCPM constituye el eje dinámico que articula los niveles de la arquitectura, lo que permite transformar datos del entorno físico y digital en conocimiento útil para la toma de decisiones. Este flujo se concibe como un proceso continuo y cíclico, estructurado en cinco etapas interdependientes: captura de datos, procesamiento inicial, análisis de datos, visualización y toma de decisiones. Su diseño garantiza trazabilidad, coherencia y oportunidad en el manejo de la información, en línea con enfoques contemporáneos de analítica de datos y sistemas de soporte a decisiones (Shmueli et al., 2019).

En la fase de captura de datos, se integran múltiples fuentes de información, incluyendo sensores IoT, dispositivos de monitoreo, sistemas BIM, registros operativos y plataformas digitales. Esta diversidad permite obtener datos en tiempo real y en modo *batch*, lo que facilita una visión integral del estado del proyecto. La literatura destaca que la integración de datos provenientes de entornos ciberfísicos es fundamental para mejorar la visibilidad y el control en sistemas complejos (Sompolgrunk et al., 2024).

En la etapa de procesamiento inicial, los datos son sometidos a procesos de depuración, validación, normalización e integración para garantizar su calidad y consistencia. Este proceso es clave para evitar errores en etapas posteriores y asegurar la interoperabilidad entre sistemas, un aspecto crítico en entornos heterogéneos (Sivarajah et al., 2024). En la fase de análisis de datos, se aplican técnicas de analítica descriptiva, predictiva y prescriptiva, apoyadas en modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático que permiten identificar patrones, anticipar riesgos y generar recomendaciones, lo que contribuye a una toma de decisiones más informada (Shmueli et al., 2019). Posteriormente, en la etapa de visualización, los resultados son representados mediante *dashboards* interactivos, indicadores clave de desempeño y herramientas de monitoreo, a fin de facilitar su interpretación por parte de los actores del proyecto. Esta representación visual es fundamental para reducir la complejidad y mejorar la comprensión de los datos.

Finalmente, en la fase de toma de decisiones, el conocimiento generado se traduce en acciones orientadas a la optimización del proyecto, como ajustes en cronogramas, asignación de recursos o mitigación de riesgos. Este proceso incorpora retroalimentación continua, a fin de permitir adaptar las decisiones a la evolución del proyecto y consolidar un enfoque de gestión basado en datos, coherente con la transformación digital en la construcción (Duan et al., 2019; Sivarajah et al., 2024).

En conjunto, este flujo garantiza la transformación coherente de la información desde su origen hasta su explotación, lo que promueve una gestión integral, adaptativa y basada en datos en proyectos de construcción.

Dimensiones operativas del framework CPD-FCPM

El *framework* CPD-FCPM se articula mediante seis dimensiones operativas que integran las capacidades tecnológicas del modelo con las fases del ciclo de vida de los proyectos de construcción. Estas dimensiones no operan de forma aislada, sino que se interrelacionan y se soportan en la arquitectura multicapa y el flujo de datos, a fin de facilitar una gestión integral, adaptativa y basada en información (Alotaibi et al., 2024; Duan et al., 2019; Shokouhi & Bachari, 2025). Las dimensiones se sintetizan de la siguiente manera:

- Dimensión de planificación y diseño digital inteligente: integra herramientas como BIM y analítica de datos para la simulación de escenarios, estimación de tiempos y costos, y optimización de decisiones en etapas tempranas. Este enfoque mejora la precisión en la planificación y reduce la incertidumbre mediante BIM 4D/5D/6D, modelado paramétrico y algoritmos de inteligencia artificial para predicción y optimización.
- Dimensión de gestión de riesgos, seguridad y análisis predictivo: incorpora analítica avanzada para identificar y mitigar riesgos. El uso de modelos predictivos y datos en tiempo real permite anticipar eventos críticos y fortalecer la seguridad en obra, apoyado con aprendizaje automático (*machine learning*), análisis de series temporales, sensores IoT y sistemas de alerta temprana.
- Dimensión de ejecución automatizada y construcción inteligente: integra tecnologías como drones, robótica y monitoreo en tiempo real para mejorar la eficiencia operativa y el control del avance. Estas capacidades reducen errores y optimizan recursos mediante visión computacional, sistemas ciberfísicos y plataformas digitales integradas con BIM.
- Dimensión de operación, monitoreo y mantenimiento inteligente: se enfoca en el uso de modelos predictivos y gemelos digitales para el seguimiento del desempeño de los activos. Permite anticipar fallos, optimizar el mantenimiento y prolongar la vida útil de los activos mediante sensores IoT, mantenimiento basado en condición y plataformas de gestión de activos.

- Dimensión de sostenibilidad y eficiencia energética basada en datos: integra herramientas analíticas para optimizar el consumo de recursos y evaluar el impacto ambiental. Esta dimensión impulsa modelos de construcción sostenibles mediante simulación energética, modelado de emisiones y plataformas de análisis de datos.
- Dimensión de gobernanza de datos y ecosistema digital: establece mecanismos para la gestión, la calidad, la seguridad y el uso ético de la información, a fin de garantizar la interoperabilidad y la confiabilidad. Se apoya en arquitecturas de datos, estándares, tecnologías *blockchain* y políticas de ciberseguridad.

Estas dimensiones permiten operacionalizar el *framework* CPD-FCPM, conectando la arquitectura técnica y el flujo de datos con la gestión práctica de los proyectos, y facilitando su implementación en entornos complejos.

Ecosistema tecnológico de soporte al framework CPD-FCPM

La implementación del *framework* CPD-FCPM requiere un ecosistema tecnológico que permita operacionalizar sus componentes, el flujo de datos y las dimensiones del modelo en entornos reales de la construcción. Este ecosistema no se concibe como un conjunto aislado de soluciones, sino como una infraestructura integrada que facilita la captura, el procesamiento, el análisis y la explotación de la información a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Este entorno articula distintos tipos de *software* y plataformas, incluyendo entre ellos sistemas BIM, herramientas de captura de datos mediante IoT, infraestructuras de almacenamiento y gestión de datos, soluciones de analítica avanzada e inteligencia artificial, así como plataformas de visualización y soporte a la toma de decisiones. Su selección responde a criterios de interoperabilidad, escalabilidad y alineación con un enfoque *data-driven*, a fin de garantizar la coherencia entre los niveles del modelo.

A continuación, se presenta una síntesis del ecosistema de herramientas tecnológicas:

- Infraestructura ciberfísica y captura de datos: incluye plataformas IoT como Azure IoT Hub, sensores inteligentes, dispositivos *wearables* y maquinaria conectada. Se complementa con herramientas geoespaciales como drones, escáneres LiDAR y *software* de fotogrametría (DJI Terra, Pix4D), que permiten la captura de datos en tiempo real y la generación de representaciones digitales del entorno físico.
- Gestión, integración y almacenamiento de datos: comprende entornos comunes de datos como Autodesk Construction Cloud o Bentley ProjectWise,

junto con plataformas como Data Lake y Data Warehouse (Azure Data Lake, Amazon Redshift, Google BigQuery). Se integran tecnologías como Apache Kafka y *blockchain* para asegurar trazabilidad, calidad e interoperabilidad.

- **Análítica avanzada e inteligencia artificial:** incluye herramientas como Python, R, Scikit-learn, XGBoost, TensorFlow y PyTorch, así como SPSS y MATLAB. Estas permiten desarrollar modelos predictivos, identificar patrones y optimizar procesos mediante análisis de datos.
- **Visualización, simulación y soporte a decisiones:** se destacan plataformas como Power BI, Tableau y Qlik Sense para dashboards interactivos, junto con herramientas de simulación como AnyLogic o Simio. También se integran sistemas de soporte a decisiones que generan recomendaciones automatizadas.
- **Gestión del ciclo de vida del proyecto:** incluye herramientas como Primavera P6, Microsoft Project, Procore, PlanGrid e IBM Maximo, que permiten integrar la información del modelo con la ejecución, operación y mantenimiento del proyecto.

En conjunto, este ecosistema permite conectar el análisis con la acción, lo que facilita la implementación del *framework* en entornos reales y su aplicación en proyectos caracterizados por alta complejidad.

Validación cuantitativa del *framework* CPD-FCPM mediante método Delphi

En esta sección se presenta la estrategia para evaluar la pertinencia, la coherencia y la viabilidad del *framework* CPD-FCPM. Para esto, se implementó un proceso de validación mediante el método Delphi bajo un enfoque cuantitativo, seleccionado por su capacidad para estructurar el juicio experto y generar consenso en contextos complejos. Se conformó un panel de cinco expertos internacionales, los cuales fueron seleccionados por su experiencia superior a ocho años en gestión de proyectos de construcción, transformación digital, inteligencia artificial, BIM y sistemas ciberfísicos, así como por su formación de posgrado y participación en proyectos de alcance internacional.

Vale precisar que el tamaño del panel se definió siguiendo recomendaciones metodológicas para estudios Delphi especializados, en las que se privilegia la experiencia y heterogeneidad de los participantes sobre el número absoluto de expertos. En este sentido, un panel reducido resulta válido cuando el fenómeno analizado es altamente específico y los participantes poseen alta experticia en el campo de estudio, como se sustenta en Belton et al. (2019) y Niederberger y Spranger (2020).

El instrumento consistió en un cuestionario estructurado que evaluó cuatro componentes del modelo (dimensiones, niveles de arquitectura, flujo de datos y ecosistema tecnológico) mediante cinco criterios (relevancia, factibilidad, innovación, impacto y claridad),

utilizando una escala Likert de cinco puntos. El proceso se desarrolló en dos rondas. En la primera, los expertos evaluaron los componentes y se calcularon medidas descriptivas, como la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. En la segunda, se compartieron los resultados para ajustar las valoraciones y favorecer la convergencia.

El análisis incluyó indicadores de consenso y confiabilidad. La media permitió valorar la aceptación, mientras que la desviación estándar y el coeficiente de variación permitieron medir el acuerdo, considerando valores inferiores a 0,20 como indicativos de un alto consenso. Adicionalmente, se calcularon el alfa de Cronbach y el coeficiente de Kendall para evaluar la consistencia interna y la concordancia del panel.

Evaluación cualitativa de la aplicabilidad del *framework* mediante grupos focales

En esta sección se presenta un ejercicio cualitativo basado en la técnica de grupo focal, orientado a evaluar la aplicabilidad del modelo en contextos reales del sector construcción. Este enfoque permite explorar percepciones, experiencias y valoraciones de los actores, lo que facilita la comprensión del *framework* desde una perspectiva operativa (Krueger & Casey, 2014).

Participaron representantes de treinta y cuatro empresas del sector construcción del nororiente colombiano, incluyendo organizaciones de obras civiles, edificaciones, interventoría y consultoría. La selección se realizó mediante muestreo intencional, considerando la experiencia en gestión de proyectos y la disposición hacia la innovación. Los participantes incluyeron a directores de proyectos, ingenieros residentes, coordinadores técnicos y gerentes, lo que permitió una visión integral del modelo.

Para la ejecución de los grupos focales se conformaron cuatro grupos: dos integrados por nueve participantes y dos por ocho participantes, respectivamente. El instrumento consistió en una guía de preguntas semiestructurada y organizada en cinco bloques:

- Pertinencia del modelo:
 - ¿En qué medida el *framework* CPD-FCPM responde a las necesidades actuales de la gestión de proyectos de construcción?
 - ¿Qué problemáticas del sector considera que el modelo aborda de manera adecuada?
- Dimensiones operativas
 - ¿Cómo evalúa la aplicabilidad de las seis dimensiones propuestas en el modelo?
 - ¿Considera que alguna dimensión requiere fortalecimiento o ajuste para su implementación?

- Arquitectura del *framework*
 - ¿Qué tan comprensible resulta la estructura multicapa del modelo?
 - ¿Qué tan viable considera su implementación en su organización?
- Flujo de datos
 - ¿Qué tan clara y útil resulta la secuencia de captura, procesamiento, análisis, visualización y toma de decisiones?
 - ¿Qué dificultades identifica para implementar este flujo en su contexto organizacional?
- Ecosistema tecnológico
 - ¿Qué tan viable considera la adopción de las herramientas tecnológicas propuestas?
 - ¿Cuáles son las principales barreras tecnológicas u organizacionales para su implementación?

Los grupos focales se desarrollaron en sesiones estructuradas que incluyeron la presentación del *framework* y una discusión guiada, y se promovió la participación activa. Las sesiones fueron moderadas por el equipo investigador y registradas mediante notas estructuradas. El análisis se realizó mediante enfoque temático. Se identificaron patrones y se agruparon en categorías asociadas a pertinencia, viabilidad, impacto y limitaciones. Este proceso complementó los resultados del método Delphi, pues aportó evidencia cualitativa sobre la aplicabilidad del modelo en entornos reales. Finalmente, cabe resaltar que la matriz de sistematización cualitativa se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://zenodo.org/records/20842885>

Estrategia de integración de resultados

La validación del *framework* CPD-FCPM se sustentó en una estrategia de triangulación metodológica orientada a integrar evidencia cuantitativa y cualitativa, con el fin de fortalecer la validez del estudio. Este enfoque permite contrastar y complementar resultados mediante distintos métodos, a fin de reducir sesgos y aportar una comprensión más integral del fenómeno (Creswell & Clark, 2017). La triangulación se estructuró a partir de dos fuentes principales: la validación técnica mediante el método Delphi y la evaluación aplicada mediante grupos focales. El método Delphi permitió analizar la consistencia del modelo, evaluando sus componentes en términos de relevancia, factibilidad, innovación, impacto y claridad, con base en el juicio de expertos internacionales y el uso de indicadores como la media, el coeficiente de variación, el alfa de Cronbach y el coeficiente de Kendall. Por su parte, el grupo focal permitió examinar la aplicabilidad del modelo en contextos reales del sector de la construcción, incorporando la perspectiva de actores empresariales y facilitando la identificación de beneficios, percepciones y barreras para su implementación.

La integración se realizó mediante un proceso de comparación y convergencia de resultados, y se identificaron coincidencias y divergencias entre la valoración experta y la percepción empresarial. Este proceso permitió validar la coherencia conceptual del modelo y ajustar su interpretación en función de su viabilidad práctica. En conjunto, esta estrategia fortalece la robustez del estudio, al validar el *framework* desde una perspectiva técnica y aplicada, lo que lo consolida como una propuesta viable para entornos complejos.

RESULTADOS

Esta sección presenta los principales hallazgos de la investigación, destacando los resultados de la validación realizada con el método Delphi, los elementos obtenidos de los grupos focales y la integración de los resultados.

Resultados de la validación cuantitativa mediante el método Delphi

En cuanto al proceso de validación Delphi, se evidencia una valoración altamente favorable del *framework* CPD-FCPM por parte del panel de expertos. La Tabla 1 presenta la síntesis de resultados de la aplicación de la evaluación con los cinco expertos internacionales.

Tabla 1
Resultados de la validación Delphi del framework CPD-FCPM

ID	Componente evaluado	Relevancia	Factibilidad	Innovación	Impacto	Claridad	Media global
D1	Planificación y diseño digital inteligente	4,6	4,4	4,6	4,5	4,5	4,52
D2	Gestión de riesgos, seguridad y análisis predictivo	4,7	4,4	4,5	4,6	4,4	4,52
D3	Ejecución automatizada y construcción inteligente	4,5	4,3	4,6	4,5	4,4	4,46
D4	Operación, monitoreo y mantenimiento inteligente	4,6	4,4	4,5	4,6	4,5	4,52
D5	Sostenibilidad y eficiencia energética basada en datos	4,5	4,3	4,5	4,6	4,4	4,46
D6	Gobernanza de datos y ecosistema digital	4,6	4,4	4,6	4,5	4,4	4,50
A1	Infraestructura ciberfísica	4,6	4,4	4,5	4,6	4,5	4,52
A2	Gestión e integración de datos	4,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,48
A3	Capa analítica e inteligencia artificial	4,7	4,4	4,7	4,6	4,5	4,58
A4	Capa de aplicación y toma de decisiones	4,6	4,5	4,5	4,6	4,6	4,56
F1	Captura de datos	4,5	4,4	4,4	4,5	4,6	4,48
F2	Procesamiento inicial de datos	4,5	4,4	4,4	4,5	4,5	4,46

(continúa)

(continuación)

ID	Componente evaluado	Relevancia	Factibilidad	Innovación	Impacto	Claridad	Media global
F3	Análisis de datos	4,7	4,5	4,7	4,6	4,5	4,60
F4	Visualización de datos	4,5	4,5	4,4	4,5	4,6	4,50
F5	Toma de decisiones	4,7	4,5	4,6	4,7	4,6	4,62
H	Ecosistema de herramientas software	4,5	4,3	4,4	4,5	4,4	4,42

La media global del modelo fue de 4,51 sobre 5,00, lo que indica un alto nivel de aceptación en términos de relevancia, factibilidad, innovación, impacto y claridad.

A nivel de componentes, las dimensiones presentaron valores entre 4,46 y 4,52, entre los que se destacaron las dimensiones relacionadas con la gestión de riesgos, el monitoreo inteligente y la planificación digital. Estos resultados sugieren que el modelo aborda adecuadamente las necesidades clave del sector, particularmente en relación con la anticipación de riesgos y la integración de tecnologías en la toma de decisiones. En cuanto a los niveles de la arquitectura, se observaron valoraciones entre 4,48 y 4,58, siendo la capa analítica y de inteligencia artificial la mejor evaluada. Este resultado es consistente con el enfoque *data-driven* del *framework*, lo que evidencia que los expertos reconocen el valor de la analítica avanzada como elemento central para la gestión inteligente de proyectos.

Respecto al flujo de datos, las etapas presentaron medias entre 4,46 y 4,62, destacándose la fase de toma de decisiones como la de mayor valoración. Esto indica que el modelo logra articular de manera efectiva la transformación de datos en acciones, lo que consolida un enfoque coherente desde la captura hasta la explotación de la información. Por su parte, el ecosistema de herramientas tecnológicas obtuvo una media de 4,42, ligeramente inferior a la del resto de componentes. Este resultado puede interpretarse como una valoración positiva, aunque más cauta, asociada a posibles desafíos en la implementación, tales como los costos, la interoperabilidad y los niveles de madurez digital organizacional.

Desde el punto de vista del consenso, los resultados muestran una desviación estándar promedio de 0,09 y un coeficiente de variación promedio de 0,019, lo que indica una baja dispersión en las respuestas y, por tanto, un alto nivel de acuerdo entre los expertos. Estos valores se encuentran dentro de los rangos considerados como de alto consenso en estudios Delphi, lo que refuerza la robustez de los resultados. En términos de confiabilidad, el instrumento alcanzó un alfa de Cronbach de 0,87, lo que evidencia una buena consistencia interna en la medición de los criterios evaluados. Asimismo, el coeficiente de concordancia de Kendall ($W = 0,79$) indica un alto nivel de acuerdo global entre los expertos, lo que confirma la estabilidad de las valoraciones.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que el *framework* CPD-FCPM es percibido como una propuesta técnicamente sólida, innovadora y con alto potencial de impacto en la gestión de proyectos de construcción. La convergencia de opiniones entre los expertos, junto con los altos niveles de aceptación y consistencia, respaldan la validez del modelo y su aplicabilidad en contextos reales.

Resultados de la evaluación cualitativa mediante grupos focales

Los resultados del grupo focal permitieron analizar la percepción de los actores del sector construcción sobre la aplicabilidad del *framework* en contextos reales. En términos generales, se evidenció una alta valoración de la pertinencia del modelo, destacándose su alineación con los procesos de transformación digital que actualmente atraviesa el sector. A partir del análisis realizado de los aportes de los participantes, se identificaron cuatro categorías recurrentes: pertinencia del *framework*, aplicabilidad operativa, beneficios esperados y barreras para la implementación.

En relación con la pertinencia del *framework*, los participantes coincidieron en que la propuesta responde a varias dificultades habituales del sector construcción. Entre ellas, mencionaron la dispersión de la información, la limitada conexión entre herramientas y la toma de decisiones apoyada en reportes incompletos o poco oportunos. Como lo expresó uno de los participantes: “En los proyectos muchas veces la información está dispersa entre planos, informes, contratistas y plataformas; un modelo que conecte esos datos puede ayudar a tomar decisiones con mayor oportunidad” (P3, comunicación personal, 2025). Esta intervención permite reconocer que el valor del *framework* no está únicamente en integrar tecnologías, sino en ofrecer una ruta para ordenar la información y convertirla en insumos útiles para la gestión del proyecto.

En cuanto a las dimensiones operativas, los participantes señalaron que estas guardan coherencia con el ciclo de vida de los proyectos de construcción. Las dimensiones de planificación digital, gestión de riesgos y monitoreo inteligente fueron percibidas como las de aplicación más inmediata, debido a su relación directa con situaciones frecuentes en obra. En palabras de uno de los representantes empresariales: “Las dimensiones de planificación, riesgos y monitoreo son las que más rápido podrían implementarse, porque son problemas que vivimos todos los días en obra: retrasos, reprocesos y decisiones tardías” (P8, comunicación personal, 2025). No obstante, también se reconoció que la sostenibilidad y la gobernanza de datos requieren mayores capacidades organizacionales. Al respecto, otro participante indicó: “La sostenibilidad y la gobernanza son importantes, pero muchas empresas todavía no tienen procesos claros para medir datos ambientales o controlar la calidad de la información” (P12, comunicación personal, 2025).

Sobre la arquitectura del *framework*, los participantes valoraron positivamente su organización por niveles, pues consideran que facilita la comprensión del papel que

cumple cada tecnología dentro del modelo. Sin embargo, también señalaron que su implementación no debería asumirse como un proceso inmediato ni uniforme para todas las organizaciones. Un participante lo explicó de la siguiente manera: “La arquitectura por niveles ayuda a entender dónde entra cada tecnología; sin embargo, para una empresa pequeña sería necesario implementarla por etapas y con acompañamiento técnico” (P17, comunicación personal, 2025). Esta apreciación muestra que la viabilidad del *framework* depende tanto de su coherencia técnica como de las condiciones reales de adopción en las empresas, especialmente en aquellas con menor disponibilidad de recursos o capacidades digitales.

Respecto al flujo de datos, los participantes destacaron que la secuencia propuesta resulta clara y útil para organizar la gestión de la información. No obstante, advirtieron que el principal reto está en lograr que los datos provenientes de distintas fuentes puedan integrarse de manera efectiva. Uno de ellos afirmó: “El flujo es claro, pero el reto está en que los sistemas se comuniquen; muchas empresas tienen información en Excel, *software* de obra, correos y documentos físicos” (P21, comunicación personal, 2025). Esta observación permite comprender que la interoperabilidad no es un aspecto secundario, sino una condición necesaria para que el enfoque basado en datos pueda operar en contextos reales.

En relación con el ecosistema tecnológico, los participantes reconocieron el potencial de las herramientas propuestas, aunque también señalaron barreras prácticas para su adopción. Los costos de implementación, la disponibilidad de personal capacitado y la integración con los procesos existentes fueron mencionados como aspectos críticos. Uno de los participantes sintetizó esta preocupación al señalar lo siguiente: “La tecnología existe y puede ser muy útil, pero el problema es el costo, la capacitación del personal y la capacidad de integrar esas herramientas con los procesos reales de la empresa” (P26, comunicación personal, 2025). Esta valoración muestra que el ecosistema tecnológico fue percibido como pertinente, pero condicionado por factores organizacionales, económicos y técnicos.

De manera transversal, los participantes resaltaron que el *framework* puede aportar a una mejor toma de decisiones, al aumento de la eficiencia operativa y a la anticipación de riesgos. Uno de los representantes lo expresó así: “Si el sistema permite alertas tempranas y muestra el avance real del proyecto, se podrían reducir decisiones reactivas y actuar antes de que el problema crezca” (P31, comunicación personal, 2025). Al mismo tiempo, se reiteró que su implementación exige inversión, gestión del cambio y fortalecimiento de capacidades digitales. Por ello, más que una adopción inmediata y total, los hallazgos sugieren la conveniencia de una implementación progresiva, ajustada al nivel de madurez tecnológica de cada organización. La matriz completa de sistematización cualitativa se encuentra disponible en el repositorio abierto indicado en la sección metodológica.

En conjunto, los resultados cualitativos muestran que el *framework* es aplicable al sector construcción, siempre que su incorporación se acompañe de condiciones habilitantes. Las voces de los participantes permiten observar una relación clara entre el valor técnico del modelo y las necesidades operativas de las empresas; sin embargo, también dejan ver que su adopción requiere una estrategia gradual, interoperabilidad entre sistemas, inversión tecnológica y fortalecimiento del talento humano.

Finalmente, las citas incorporadas en esta sección fueron anonimizadas mediante códigos alfanuméricos asignados a los participantes, con el fin de proteger su identidad y la de las organizaciones representadas. Estas citas provienen de la matriz de sistematización cualitativa elaborada a partir de las notas estructuradas del grupo focal, en la cual se organizaron las intervenciones según categorías temáticas asociadas a pertinencia, aplicabilidad operativa, beneficios esperados y barreras de implementación.

Integración de resultados y validación del modelo

La integración de los resultados cuantitativos y cualitativos evidencia una alta convergencia entre la valoración experta y la percepción empresarial, lo que fortalece la validez del *framework* CPD-FCPM desde una perspectiva tanto técnica como aplicada. Desde el enfoque cuantitativo, el modelo alcanzó una media global de 4,51 sobre 5, con valores superiores a 4,45 en la mayoría de sus componentes, lo que indica una valoración consistentemente alta en términos de relevancia, factibilidad, innovación, impacto y claridad. Asimismo, el coeficiente de variación promedio de 0,019 refleja un elevado nivel de consenso entre los expertos, mientras que el alfa de Cronbach de 0,87 y el coeficiente de concordancia de Kendall ($W = 0,79$) evidencian una adecuada consistencia interna y un grado significativo de acuerdo, parámetros que se consideran robustos en estudios Delphi aplicados a contextos tecnológicos complejos (Hsu & Sandford, 2007; Okoli & Pawlowski, 2004).

En cuanto al análisis por componentes, se destaca que la capa analítica e inteligencia artificial, así como la etapa de toma de decisiones dentro del flujo de datos, obtuvieron las valoraciones más altas, con medias cercanas a 4,60. Este resultado refuerza el enfoque *data-driven* del modelo, en el que la generación de conocimiento a partir de datos y su traducción en decisiones operativas constituye el núcleo de valor del *framework*. De igual manera, las dimensiones relacionadas con la gestión de riesgos, la planificación digital y el monitoreo inteligente presentaron altos niveles de aceptación, lo que evidencia su alineación con las necesidades prioritarias del sector construcción.

Desde la perspectiva cualitativa, los resultados del grupo focal con representantes de treinta y cuatro empresas corroboran esta valoración, destacando una percepción positiva frente a la pertinencia y utilidad del modelo. Los participantes reconocieron que el *framework* ofrece una estructura clara para integrar tecnologías emergentes en la gestión de proyectos, particularmente en lo relacionado con la mejora en la toma de

decisiones, la optimización de recursos y la anticipación de riesgos. Esta coincidencia entre la valoración experta y la percepción empresarial refuerza la validez del modelo desde una doble perspectiva: técnica y contextual.

No obstante, la integración de resultados también permitió identificar brechas relevantes. En el análisis cuantitativo, el ecosistema de herramientas tecnológicas obtuvo una media de 4,42, ligeramente inferior al resto de componentes, lo que sugiere una percepción más cauta frente a su implementación. Este hallazgo se ve respaldado por los resultados cualitativos, en los que los participantes identificaron como principales desafíos la inversión requerida, la interoperabilidad entre sistemas y la disponibilidad de talento especializado. Estas limitaciones coinciden con lo reportado en la literatura sobre la adopción de tecnologías digitales en la construcción, donde factores organizacionales y tecnológicos condicionan su implementación efectiva (Omokhua et al., 2025; Shojaei et al., 2023; Zabala-Vargas et al., 2023).

En conjunto, la triangulación metodológica confirma que el *framework* CPD-FCPM no solo presenta una estructura conceptualmente sólida y coherente, sino también una viabilidad práctica significativa, al ser reconocido como una herramienta potencialmente aplicable en entornos reales. Esta convergencia entre la evidencia cuantitativa y cualitativa posiciona el modelo como una propuesta integral que articula capacidades tecnológicas avanzadas con las dinámicas operativas del sector construcción, lo que contribuye a su transformación hacia esquemas de gestión más inteligentes, adaptativos y basados en datos.

DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que el *framework* CPD-FCPM responde de manera consistente a las principales limitaciones identificadas en la literatura sobre la gestión de proyectos de construcción, especialmente a la fragmentación de datos, la baja interoperabilidad y la limitada capacidad de análisis en tiempo real. Los altos niveles de aceptación obtenidos con el método Delphi (media global de 4,51) coinciden con estudios que destacan el potencial de los enfoques *data-driven* y la inteligencia artificial para mejorar la toma de decisiones en entornos complejos (Datta et al., 2024; Huang et al., 2021). Asimismo, el énfasis en la capa analítica refuerza lo planteado por Duan et al. (2019), quienes destacan la capacidad de la inteligencia artificial para transformar datos en acciones estratégicas.

En términos de arquitectura, el enfoque multicapa se alinea con las tendencias en la integración de sistemas ciberfísicos, BIM y gemelos digitales (Alves et al., 2025; Sacks et al., 2020; Sompolgrunk et al., 2024). A diferencia de estudios que abordan estas tecnologías de forma aislada, el CPD-FCPM propone una integración estructurada que articula captura, gestión, análisis y explotación de datos, lo que contribuye a cerrar la brecha identificada por Parsamehr et al. (2023) y Shokouhi & Bachari (2025) sobre la

falta de *frameworks* integradores. Respecto al flujo de datos, se destaca la alta valoración de la etapa de toma de decisiones (media de 4,62), lo que evidencia la importancia de estructurar procesos analíticos que transformen datos en conocimiento accionable. Este resultado es coherente con investigaciones sobre *pipelines* de datos y analítica continua (Shmueli et al., 2019; Sivarajah et al., 2024). No obstante, persisten desafíos en la integración de datos procedentes de múltiples fuentes, lo que coincide con lo reportado por Wu & AbouRizk (2023) y Sompolgrunk et al. (2024), quienes señalan la interoperabilidad como una barrera clave.

Las dimensiones operativas del modelo muestran una alta alineación con las necesidades del sector, especialmente en la gestión de riesgos, la planificación digital y el monitoreo inteligente, en concordancia con estudios sobre inteligencia artificial y análisis predictivo (Craveiro & Domingues, 2025; Feng, 2022). Sin embargo, las dimensiones de sostenibilidad y gobernanza de datos presentan un menor grado de madurez, lo que refleja una tendencia reportada en la literatura (Cui et al., 2023; Shokouhi & Bachari, 2025). Un hallazgo relevante es la menor valoración del ecosistema tecnológico (4,42), lo que evidencia desafíos en su implementación asociados a factores organizacionales, económicos y técnicos. Esto coincide con estudios que señalan que la adopción tecnológica depende de la madurez organizacional, la disponibilidad de talento y la integración de sistemas (Shojaei et al., 2023; Shokouhi & Bachari, 2025). En este sentido, el CPD-FCPM no elimina estas barreras, pero las visibiliza y propone una estructura para su abordaje.

La triangulación metodológica permitió validar el modelo tanto en términos de su consistencia técnica como de su aplicabilidad en contextos reales, según lo planteado por Creswell & Clark (2017) sobre la pertinencia de enfoques mixtos. La convergencia entre expertos y actores del sector evidencia un equilibrio entre rigor conceptual y viabilidad práctica. Finalmente, el principal aporte del estudio radica en la formulación de un *framework* integrador que supera enfoques fragmentados y articula arquitectura, datos, analítica y gestión de proyectos. Este modelo facilita la transición hacia una gestión más inteligente y basada en datos, aunque su implementación requiere maduración organizacional, inversión tecnológica y desarrollo de capacidades, lo que abre líneas futuras de investigación en distintos contextos del sector construcción.

CONCLUSIONES

El presente estudio tuvo como propósito diseñar y validar el *framework* CPD-FCPM, orientado a fortalecer la gestión de proyectos de construcción mediante la integración de tecnologías emergentes, analítica de datos y sistemas ciberfísicos. Los resultados evidencian que el modelo constituye una alternativa robusta para abordar las limitaciones estructurales del sector, especialmente en términos de fragmentación de la información, interoperabilidad y análisis en tiempo real.

Desde el punto de vista técnico, el *framework* presenta una alta coherencia estructural, validada mediante el método Delphi con una valoración global de 4,51/5 y adecuados niveles de confiabilidad ($\alpha = 0,87$; $W = 0,79$). Estos resultados confirman su pertinencia en términos de relevancia, factibilidad e innovación, destacando la arquitectura multicapa, el enfoque *data-driven* y el flujo de datos como elementos clave para la toma de decisiones. En el ámbito aplicado, la evaluación cualitativa con treinta y cuatro empresas del sector permitió corroborar su viabilidad en contextos reales. Los participantes resaltaron su utilidad para mejorar la toma de decisiones, optimizar recursos y anticipar riesgos, aunque también se identificaron desafíos asociados a la inversión tecnológica, la interoperabilidad y la disponibilidad de talento especializado.

El principal aporte del estudio radica en la formulación de un modelo integrador que articula de manera coherente la captura, la gestión, el análisis y el uso de datos dentro de una arquitectura estructurada. A diferencia de enfoques fragmentados, el *framework* CPD-FCPM vincula capacidades tecnológicas con dimensiones operativas del ciclo de vida del proyecto, lo que facilita una gestión más adaptativa y basada en evidencia. Asimismo, la triangulación metodológica permitió validar el modelo desde una doble perspectiva: técnica y contextual. Esto fortalece su robustez y contribuye a reducir la brecha entre desarrollo conceptual y aplicación práctica. No obstante, el estudio presenta limitaciones relacionadas con el número de expertos, el alcance geográfico de la validación cualitativa y la ausencia de una implementación longitudinal.

Futuras investigaciones deberían enfocarse en la aplicación del *framework* en proyectos reales, el análisis de su impacto en indicadores de desempeño y en su adaptación a distintos niveles de madurez digital. En conclusión, el CPD-FCPM se consolida como una propuesta viable para avanzar hacia modelos de gestión más inteligentes, integrados y orientados a datos en el sector construcción.

REFERENCIAS

- Akbari, S., Khanzadi, M., & Gholamian, M. R. (2018). Building a rough sets-based prediction model for classifying large-scale construction projects based on sustainable success index. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(4), 534-558. <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2016-0110>
- Alotaibi, B. S., Shema, A. I., Ibrahim, A. U., Abuhussain, M. A., Abdulmalik, H., Dodo, Y. A., & Atakara, C. (2024). Assimilation of 3D printing, artificial intelligence (AI) and internet of things (IoT) for the construction of eco-friendly intelligent homes: An explorative review. *Heliyon*, 10(17), e36846. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36846>
- Alves, J. L., Palha, R. P., & Filho, A. T. de A. (2025). Towards an integrative framework for BIM and artificial intelligence capabilities in smart architecture, engineering,

- construction, and operations projects. *Automation in Construction*, 174, 106168. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106168>
- Baghalzadeh Shishehgharkhaneh, M., Keivani, A., Moehler, R. C., Jelodari, N., & Roshdi Laleh, S. (2022). Internet of things (IoT), building information modeling (BIM), and digital twin (DT) in construction industry: A review, bibliometric, and network analysis. *Buildings*, 12(10), 1503. <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>
- Belton, I., MacDonald, A., Wright, G., & Hamlin, I. (2019). Improving the practical application of the Delphi method in group-based judgment: A six-step prescription for a well-founded and defensible process. *Technological Forecasting and Social Change*, 147, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.07.002>
- Chathuranga, S., Jayasinghe, S., Antucheviciene, J., Wickramarachchi, R., Udayanga, N., & Weerakkody, W. S. (2023). Practices driving the adoption of agile project management methodologies in the design stage of building construction projects. *Buildings*, 13(4), 1079. <https://doi.org/10.3390/buildings13041079>
- Craveiro, M., & Domingues, L. (2025). Artificial intelligence on project management performance domains. *Procedia Computer Science*, 256, 1583-1590. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.294>
- Creswell, J. W., & Clark, V. L. P. (2017). *Designing and conducting mixed methods research*. Sage.
- Cui, Y., Ma, Z., Wang, L., Yang, A., Liu, Q., Kong, S., & Wang, H. (2023). A survey on big data-enabled innovative online education systems during the COVID-19 pandemic. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(1), 100295. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100295>
- Datta, S. D., Islam, M., Sobuz, M. H. R., Ahmed, S., & Kar, M. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(5), e26888. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>
- Duan, Y., Edwards, J. S., & Dwivedi, Y. K. (2019). Artificial intelligence for decision making in the era of big data—Evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*, 48, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021>
- Feng, N. (2022). The influence mechanism of BIM on green building engineering project management under the background of big data. *Applied Bionics and Biomechanics*, 8227930. <https://doi.org/10.1155/2022/8227930>
- Greeshma, A. S., & Edayadiyil, J. B. (2022). Automated progress monitoring of construction projects using machine learning and image processing approach. *International*

- Conference on Advances in Construction Materials and Structures*, 65, 554-563. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.137>
- Hsu, C.-C., & Sandford, B. A. (2007). The delphi technique: Making sense of consensus. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 12(1), 10. <https://doi.org/10.7275/PDZ9-TH90>
- Huang, Y., Shi, Q., Zuo, J., Pena-Mora, F., & Chen, J. (2021). Research status and challenges of data-driven construction project management in the big data context. *Advances in Civil Engineering*, 6674980. <https://doi.org/10.1155/2021/6674980>
- Jakobsen, S. M., Momme, M. B., & Kadenic, M. D. (2025). Exploring strategies for successful implementation of IT projects: Integrating project management practices and human factors. *Procedia Computer Science*, 256, 1493-1504. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.283>
- Kerzner, H. (2025). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. John Wiley & Sons.
- Krueger, R. A., & Casey, M. A. (2014). *Focus groups: A practical guide for applied research* (5.^a ed.). Sage.
- Niederberger, M., & Spranger, J. (2020, 21 de septiembre). Delphi technique in health sciences: A map. *Frontiers in Public Health*, 8, Article 457. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00457>
- Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>
- Omokhua, D., Mayouf, M., Ashayeri, I., Ekanayake, E., & Zalloom, B. (2025). Adoption of BIM in architectural firms in Nigeria: A survey of current practices, challenges and enablers. *Buildings*, 15(24), 4547. <https://doi.org/10.3390/buildings15244547>
- Pan, M., Yang, Y., Zheng, Z., & Pan, W. (2022). Artificial intelligence and robotics for prefabricated and modular construction: A systematic literature review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(9), 03122004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002324)
- Parsamehr, M., Perera, U. S., Dodanwala, T. C., Perera, P., & Ruparathna, R. (2023). A review of construction management challenges and BIM-based solutions: Perspectives from the schedule, cost, quality, and safety management. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24, 353-389. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42107-022-00501-4>

- Qian, Z., Yang, X., Xu, Z., & Cai, W. (2021). Research on key construction technology of building engineering under the background of big data. *Journal of Physics: Conference Series*, 1802, 032003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1802/3/032003>
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 1, e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Shmueli, G., Bruce, P. C., Gedeck, P., & Patel, N. R. (2019). *Data mining for business analytics: Concepts, techniques and applications in Python*. John Wiley & Sons.
- Shojaei, R. S., Oti-Sarpong, K., & Burgess, G. (2023). Enablers for the adoption and use of BIM in main contractor companies in the UK. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(4), 1726-1745. <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2021-0650>
- Shokouhi, M., & Bachari, M. S. (2025). An overview of the aspects of sustainability in project management. *Progress in Engineering Science*, 2(1), 100048. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100048>
- Sivarajah, U., Kumar, S., Kumar, V., Chatterjee, S., & Li, J. (2024). A study on big data analytics and innovation: From technological and business cycle perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 202, 123328. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123328>
- Sompolgrunk, A., Banihashemi, S., Golzad, H., & Nguyen, K. L. (2024). Strategic alignment of BIM and big data through systematic analysis and model development. *Automation in Construction*, 168, 105801. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105801>
- Wu, L., & AbouRizk, S. (2023). Towards construction's digital future: A roadmap for enhancing data value. En S. Walbridge, M. Nik-Bakht, K. T. W. Ng, M. Shome, M. S. Alam, A. el Damatty & G. Lovegrove (Eds.), *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference 2021* (pp. 225-238). CSCE. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29564.67205>
- Zabala-Vargas, S., Jaimes-Quintanilla, M., & Jimenez-Barrera, M. H. (2023). Big data, data science, and artificial intelligence for project management in the architecture, engineering, and construction industry: A systematic review. *Buildings*, 13(12), 2944. <https://doi.org/10.3390/buildings13122944>