Inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM como herramienta de control de proyectos de infraestructura vial

Gestión innovadora en proyectos viales: propuesta de estrategias para mejorar el control mediante inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en Colombia.

Walter Andres Jojoa Giraldo

Juan Sebastián Vesga Fierro

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

2026

Gestión innovadora en proyectos viales: propuesta de estrategias para mejorar el control mediante inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en Colombia.

Walter Andres Jojoa Giraldo

Juan Sebastián Vesga Fierro

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor

Sergio Andres Zabala Vargas

PhD. Tecnología Educativa

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

2026

Gestión innovadora en proyectos viales: propuesta de estrategias para mejorar el control mediante inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en Colombia.

Contenido

Lista de tablas 6
Lista de figuras 7
Lista de anexos 8
Resumen 9
Abstract 10
Introducción 11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
1.1 Descripción del problema 15
1.2 La pregunta de investigación 18
1.3 Los objetivos de investigación 19
1.3.1 Objetivo general 19
1.3.2 Objetivos específicos 19
1.4 Justificación de la investigación 20
2 MARCO DE REFERENCIA 24
2.1 Marco de antecedentes 24
2.2 Marco teórico 29
2.2.1 Gestión de proyectos 29
2.2.2 Control de proyectos de infraestructura vial 30
2.2.3 Infraestructura vial en Colombia 30
2.2.4 Transformación digital en el sector de la construcción 31
2.2.5 Building Information Modeling (BIM) 32
2.2.6 Inteligencia artificial y ciencia de datos aplicadas a la gestión de proyectos 33
2.3 Marco normativo 34
3 METODOLOGÍA 35
3.1 Enfoque y alcance de la investigación 35
3.2 Población y muestra 37
3.2.1 Definición de la población 37
3.2.2 Cálculo y selección de la muestra 39

3.3 Instrumentos ... 41
3.3.1 Revisión sistemática de la Literatura ... 41
3.3.2 Encuesta sobre el nivel de Madurez Tecnológica ... 43
3.4 Descripción de procedimientos ... 44
3.4.1 Fase 1: Revisión de la literatura ... 46
3.4.2 Medición del nivel de madurez tecnológico ... 50
3.5 Análisis de información ... 55
3.5.1 Codificación de la información ... 57
3.5.2 Análisis de los datos según el instrumento ... 58
3.5.3 Presentación de los resultados ... 59
3.6 Consideraciones éticas ... 60
4 HIPOTESIS ... 62
4.1 Las variables ... 63
4.1.1 Variable independiente ... 63
4.1.2 Variables dependientes ... 63
5 RESULTADOS ... 64
5.1 Presentación de los resultados ... 64
5.1.1 Resultados de la revisión documental ... 64
5.1.2 Resultados de la encuesta ... 74
5.2 Propuesta al sector ... 123
5.2.1 Introducción a la propuesta ... 123
5.2.2 Diagnóstico base: síntesis de hallazgos ... 124
5.2.3 Hallazgos desde la revisión de literatura ... 125
5.2.4 Hallazgos desde la encuesta de madurez tecnológica ... 126
5.2.5 Ejes estratégicos de implementación ... 128
5.2.6 Ruta de implementación gradual ... 136
6 Discusión ... 142
7 CONCLUSIÓN ... 145
8 RECOMENDACIONES ... 148
8.1.1 Para el Ministerio de Transporte y el Departamento Nacional de Planeación ... 148
8.1.2 Para el INVÍAS y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) ... 149

8.1.3 Para las empresas contratistas e interventoras 150
8.1.4 Para las universidades e instituciones de educación superior 152
Referencias bibliográficas 153
Anexos 162

Gestión innovadora en proyectos viales: propuesta de estrategias para mejorar el control mediante inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en Colombia.

Lista de tablas

Tabla 1. Limitaciones en el control de construcción de infraestructura vial en Colombia..... 65
Tabla 2. Inteligencia artificial y ciencia de datos aplicadas a la construcción 66
Tabla 3. Implementación de la metodología BIM en proyectos de construcción 67
Tabla 4 Modelo de negocio y producto - Nivel estratégico 74
Tabla 5 Áreas de inversión tecnológica en los últimos dos años..... 76
Tabla 6 Áreas de inversión tecnológica proyectada para los próximos cinco años 78
Tabla 7 Clientes y proveedores – Nivel de implementación de sistemas de información e integración..... 81
Tabla 8 Nivel de digitalización en la gestión de clientes, proveedores e información comercial 83
Tabla 9 Tecnologías utilizadas actualmente en las organizaciones 86
Tabla 10 Grado de implementación de funcionalidades de conectividad e interoperabilidad..... 88
Tabla 11 Nivel de digitalización en la prestación de servicios..... 90
Tabla 12 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización 93
Tabla 13 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización 95
Tabla 14 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización 97
Tabla 15 Organización de la gestión de tecnologías de la información..... 99
Tabla 16 Nivel de cumplimiento en equipos e infraestructura tecnológica 102
Tabla 17 Seguridad de la información en el contexto de la transformación digital 104
Tabla 18 Método de registro de la información generada por los procesos organizacionales..... 106
Tabla 19 Disponibilidad de roles especializados en transformación digital 108
Tabla 20 Nivel de capacitación del talento humano en competencias para la transformación digital..... 111
Tabla 21 Adopción de sistemas inteligentes para la mejora de ineficiencias en los procesos..... 114
Tabla 22 Ambición estratégica de la organización frente a la Industria 4.0 117
Tabla 23 Nivel de importancia asignado a las tecnologías emergentes en la organización..... 120

Gestión innovadora en proyectos viales: propuesta de estrategias para mejorar el control mediante inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en Colombia.

Lista de figuras

Ilustración 1 Cálculo del tamaño de muestra 40

Lista de anexos

Anexo 1. Encuesta nivel de madurez tecnológica (apropiación) en la gestión de proyectos 162

Anexo 2. Declaración inicial e información general sobre Encuesta de nivel de madurez tecnológico.... 178

Resumen

Palabras clave: Infraestructura Vial, Inteligencia Artificial, BIM, Ciencia de Datos, Madurez Tecnológica, Control de Proyectos.

Los proyectos de infraestructura vial en Colombia presentan deficiencias estructurales en sus mecanismos de control y supervisión, evidenciadas en más de 1.647 alertas por irregularidades valoradas en 71,8 billones de pesos reportadas por la Contraloría General de la República en 2024. Esta investigación analiza dichas limitaciones y propone estrategias para implementar herramientas de inteligencia artificial (IA), ciencia de datos y la metodología BIM como alternativas para optimizar el control de estos proyectos. El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, apoyado en dos instrumentos: una revisión sistemática de literatura en Scopus con 259 artículos del período 2016–2025, y una encuesta de madurez tecnológica con 331 respuestas, de las cuales 73 corresponden al sector de la construcción e ingeniería. Los resultados revelan una madurez digital incipiente en el sector: la IA es utilizada por apenas el 4 % de las organizaciones, BIM por el 1 % y la comunicación máquina a máquina por el 5,5 %. El 65,8 % no cuenta con departamento de TI propio, el 42,5 % carece de roles especializados en transformación digital, y el 68,5 % no tiene sus registros de proceso completamente digitalizados. No obstante, el 69,9 % ya utiliza servicios en la nube y el 55,5 % reconoce la formación del talento humano como factor de alta importancia, lo que representa una base para la transformación gradual. Como respuesta, se diseñó una propuesta estratégica estructurada en tres ejes: digitalización e integración de la información, implementación tecnológica para el control predictivo, y fortalecimiento institucional y del talento humano, organizada en tres fases de implementación progresiva a lo largo de 60 meses. Se concluye que la transformación digital del control de proyectos viales en Colombia es una necesidad estratégica que requiere intervención simultánea en las dimensiones tecnológica, organizacional e institucional.

Abstract

Keywords: Road Infrastructure, Artificial Intelligence, BIM, Data Science, Technological Maturity, Project Control.

Road infrastructure projects in Colombia present structural deficiencies in their control and supervision mechanisms, evidenced by more than 1,647 irregularity alerts valued at 71.8 trillion pesos reported by the Contraloría General de la República in 2024. This research analyzes these limitations and proposes strategies to implement artificial intelligence (AI), data science, and BIM methodology as alternatives to optimize project control.

The study adopted a quantitative approach, supported by two instruments: a systematic literature review in Scopus comprising 259 articles from 2016–2025, and a technological maturity survey with 331 responses, of which 73 belong to the construction and engineering sector.

Results reveal an incipient digital maturity in the sector: AI is used by only 4% of organizations, BIM by 1%, and machine-to-machine communication by 5.5%. Furthermore, 65.8% lack an internal IT department, 42.5% have no specialized digital transformation roles, and 68.5% have not fully digitized their process records. Nevertheless, 69.9% already use cloud services and 55.5% recognize human talent development as highly important, representing a foundation for gradual transformation.

In response, a strategic proposal was designed around three axes: digitalization and information integration, technological implementation for predictive control, and institutional and human talent strengthening, organized into three progressive implementation phases over 60 months. It is concluded that the digital transformation of road project control in Colombia is a strategic necessity requiring simultaneous intervention across technological, organizational, and institutional dimensions.

Introducción

El desarrollo de proyectos de infraestructura vial en el país ha representado un eje fundamental para el crecimiento económico y social del país, este desarrollo está representado por la construcción y mejoramiento de las vías que no solo facilita la movilidad de las personas y mercancías dentro del territorio nacional, también posibilita la integración de las regiones y la apertura a nuevos mercados y oportunidades de inversión. Dicho así, las carreteras se convierten en un componente estratégico para el fortalecimiento de la competitividad, reflejado en la reducción de costos a nivel logístico y la promoción del comercio, siendo estos factores que tienen la capacidad de generar impacto en la calidad de vida de la población en general. Sin embargo, a pesar de la relevancia que tiene este sector, su ejecución se ha visto manchada por múltiples limitaciones relacionadas con el control y la supervisión de las obras. Estas limitaciones se manifiestan en sobrecostos, incumplimiento de cronogramas, deficiencias técnicas atribuibles tanto a contratistas como a las interventorías, y en prácticas irregulares de carácter administrativo que en la mayoría de los casos son asociadas con corrupción (Canales et al., 2023). Lo expuesto anteriormente no solo afecta la eficiencia de la ejecución de los proyectos, sino que también genera una pérdida significativa de confianza en las instituciones responsables de la planeación y el seguimiento de estos proyectos.

Uno de los problemas con más criticidad radica en la limitada capacidad técnica de las entidades encargadas de la interventoría y el control de los proyectos. Con frecuencia estas entidades carecen de herramientas adecuadas para identificar y mitigar riesgos de manera oportuna, lo que genera brechas en los procesos de supervisión tanto a nivel operativo y técnico como administrativo y financiero. Esta situación se ha evidenciado en múltiples proyectos, siendo el caso de la concesión de la Ruta del Sol II uno de los ejemplos más representativos. Dicho proyecto no expuso solamente serias falencias en la planeación y el seguimiento, sino que también mostró cómo la ausencia de metodologías de control más

sólidas puede desencadenar consecuencias graves en términos económicos, legales y sociales (León Gutiérrez, 2021).

En este sentido, la adopción de nuevas tecnologías se configura como una oportunidad estratégica que abre un horizonte prometedor para superar las limitaciones tradicionales que enfrenta la gestión de los proyectos de infraestructura vial en el país. La transformación digital aplicada a este sector no debe entenderse solo como una tendencia global, sino como una necesidad para mejorar la eficiencia, reducir costos y garantizar mayor transparencia en la ejecución de las obras. Una de las herramientas más importantes en este campo es la metodología Building Information Modelling (BIM), la cual se ha posicionado en los últimos años como un modelo innovador de gestión en el ciclo de vida de los proyectos de construcción a nivel general. Su valor está en la planificación colaborativa y posibilita la identificación temprana de interferencias en la fase de diseño, lo que viene a reducir errores durante la ejecución. Investigaciones recientes han mostrado cómo el uso de la metodología BIM en proyectos de infraestructura incrementa la productividad, optimiza los recursos disponibles y contribuye a la toma de decisiones informadas (Jezreel Fonseca et al., 2024).

Sumado a lo anterior, el impulso que se le ha dado a la inteligencia artificial (IA) y a la ciencia de datos abre nuevas posibilidades para la gestión de proyectos. A través de estas herramientas es posible procesar grandes volúmenes de información generados en el desarrollo de obras, lo que ofrece un insumo valioso para anticipar riesgos potenciales, detectar patrones de fallos recurrentes y elaborar modelos predictivos que apoyen la toma de decisiones. Por ejemplo, mediante algoritmos de aprendizaje se pueden prever retrasos en cronogramas, analizar desviaciones en presupuestos o evaluar el impacto de factores externos como las condiciones climáticas o las variaciones en los precios de materiales (Flores & Ascaño, 2025). Adicionalmente, la integración de la IA y ciencia de datos con la metodología BIM potencia las capacidades de control, ya que permite la creación de modelos inteligentes en los que la información se puede actualizar en tiempo real y se genera una trazabilidad completa del proyecto. Esto no solo debería

incrementar la eficiencia técnica y financiera, sino también fortalecer la transparencia y la rendición de cuentas frente a las instituciones públicas.

Para abordar la problemática descrita, esta investigación adopta un enfoque cuantitativo, el cual permite recopilar y analizar datos medibles provenientes de dos instrumentos estructurados: una revisión sistemática de literatura científica y una encuesta de madurez tecnológica aplicada a profesionales del sector de la construcción e ingeniería. Este enfoque posibilita la identificación de patrones estadísticos, la medición del nivel de adopción tecnológica y la construcción de evidencia empírica que fundamenta la propuesta estratégica desarrollada. A través de instrumentos estandarizados es posible obtener información sistemática y comparable que contribuye a optimizar la planificación y el control de los recursos en proyectos de infraestructura vial (Sampieri et al., 2018).

En este sentido, esta investigación está orientada a examinar de manera detallada cómo la incorporación de tecnologías emergentes, particularmente la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM, puede convertirse en un factor determinante para superar las limitaciones que actualmente enfrenta el control de los proyectos de infraestructura vial en el país. El propósito central de la investigación no se limita únicamente a describir el impacto de estas herramientas, sino también a comprender la forma en que su integración puede generar un cambio estructural en los procesos de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de las obras. El análisis busca, en primer lugar, aportar evidencia empírica que permita demostrar la eficacia de estas tecnologías en la detección temprana de riesgos, la reducción de sobrecostos, la optimización del uso de recursos y la mejora en la transparencia de la gestión. Asimismo, se pretende identificar los desafíos que podrían surgir durante su implementación, tales como la necesidad de capacitación del personal, la adaptación de las instituciones públicas a nuevas dinámicas digitales y los costos iniciales asociados a la modernización de los procesos.

El documento se encuentra organizado en siete capítulos. El Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema, describiendo las limitaciones estructurales del control de proyectos viales en Colombia, la pregunta de investigación, los objetivos y la justificación del estudio. El Capítulo 2 desarrolla el marco de referencia, que comprende los antecedentes investigativos, el marco teórico sobre las tecnologías emergentes abordadas y el marco normativo que regula el sector. El Capítulo 3 expone la metodología adoptada, incluyendo el enfoque y alcance de la investigación, la población y muestra, los instrumentos de recolección de datos, el procesamiento de la información y las consideraciones éticas. El Capítulo 4 presenta la hipótesis de investigación y las variables independiente y dependientes del estudio.

El Capítulo 5 contiene los resultados de la investigación, organizados en dos grandes componentes: la presentación y análisis de los datos obtenidos mediante la encuesta de madurez tecnológica, y la propuesta estratégica para la implementación gradual de IA, ciencia de datos y BIM en el control de proyectos viales, estructurada en ejes estratégicos, ruta de implementación y recomendaciones institucionales. El Capítulo 6 desarrolla la discusión de los hallazgos, contrastando los resultados con la literatura científica revisada y evaluando el alcance y las limitaciones del estudio. Finalmente, el Capítulo 7 presenta las conclusiones de la investigación, sintetizando los aportes más relevantes en relación con cada uno de los objetivos específicos planteados.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Limitaciones en el control de proyectos de construcción de infraestructura vial en Colombia.

1.1 Descripción del problema

El control de proyectos de infraestructura vial es un reto global, enfrentando desafíos similares en distintos países. Por ejemplo, según el informe de Prado y CoST – Infrastructure Transparency Initiative (2025), al analizar 480 proyectos en múltiples países, se encontró que el 70 % de los proyectos sufren retrasos respecto a los plazos inicialmente contratados, lo que indica que los cronogramas suelen ser poco realistas o sufren alteraciones por causas externas e internas, como deficiencias en la planificación o la transparencia. Además, en países latinoamericanos y otras regiones que están en desarrollo, se presentan casos similares: falta de seguimiento apropiado, sistemas de control de calidad débiles y dependencia de procedimientos burocráticos que retrasan la toma de decisiones. Tal como lo señalan Serna et al. (2018), esta fragmentación genera superposición de funciones, duplicidad en los procedimientos y en muchos casos una dispersión de responsabilidades que debilita el proceso de fiscalización. Estas falencias se traducen en una gestión poco eficiente de los contratos, lo cual repercute en la demora de la toma de decisiones para el desarrollo de las obras

Otro ejemplo lo ofrece un estudio reciente sobre proyectos de infraestructura educativa en Colombia, que, aunque no corresponde a proyectos viales, resulta ilustrativo para comprender la magnitud y naturaleza de los problemas de gestión en obras públicas. La investigación evidencia que las desviaciones en costos y tiempos de entrega no solo obedecen a deficiencias en la planeación inicial, sino también a la ausencia de mecanismos adecuados para la gestión, procesamiento y análisis de la información recolectada durante la ejecución. Dicho estudio pone de manifiesto que la falta de sistemas integrados de control y la utilización de metodologías

desactualizadas generan cuellos de botella administrativos que impactan negativamente la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos. Esto demuestra que los problemas de supervisión y control son multifacéticos, se reproducen en diferentes tipos de infraestructura y no pueden atribuirse únicamente a la naturaleza del sector en el que se desarrollan, sino a falencias estructurales en la gestión pública y privada (Gómez Cabrera et al., 2025).

En Colombia, los problemas en el control de proyectos de infraestructura vial no son nuevos y están bien documentados. La Contraloría General de la República ha emitido múltiples alertas sobre infraestructura vial, señalando proyectos con avances físicos mucho menores a los programados, suspensiones prolongadas y diferencias marcadas entre los avances físicos y financieros de los contratos. En su informe de abril de 2024, la Contraloría identificó 1.647 alertas correspondientes a posibles irregularidades valoradas en 71,8 billones de pesos, de las cuales más del 19 % están relacionadas con proyectos viales. (Revista Semana, 2024)

Un caso que ilustra estas limitaciones es el programa Caminos Comunitarios de la Paz Total, diseñado para intervenir más de 33.000 km de vías terciarias en 26 departamentos, con una inversión estimada de 8 billones de pesos. Hasta octubre de 2024, solo se habían concluido 728 de los contratos suscritos, mientras que muchos otros estaban firmados, pero no iniciados, suspendidos, o con ejecución parcial. Estas demoras y fallas en el seguimiento evidencian problemas de interventoría y control en campo, así como deficiencias en la planeación y asignación de recursos. (Revista Semana, 2024)

En departamentos con abundantes zonas rurales, vías terciarias, zonas con topografía difícil, estas limitaciones se acentúan: la capacidad técnica para supervisar calidad de materiales es limitada, los recursos para interventoría son escasos, y los mecanismos de seguimiento como

reportes, inspecciones, y actualización tecnológica suelen ser manuales o poco sistemáticos. En muchos casos, los informes de avance físico comparado con el avance financiero se elaboran con retraso o con datos incompletos, lo que impide detectar fallas tempranas y tomar acciones correctivas oportunas. Esto obliga a postergar decisiones, reprogramar actividades, incurrir en costos adicionales, o incluso suspender obras. De acuerdo con Canales et al. (2023), estas deficiencias han generado incumplimientos en los cronogramas contractuales y han incrementado los presupuestos iniciales, afectando no solo a los contratistas y al Estado, sino también a las comunidades que esperan dar uso a la infraestructura. Esta situación refleja un manejo ineficiente de los recursos y evidencia la necesidad de incorporar tecnologías que optimicen la gestión del tiempo y del dinero invertido.

En Colombia, bastantes obras viales presentan plazos incumplidos, lo que incrementa costos no previstos. La falta de planificación rigurosa, incluyendo estimaciones de tiempos realistas, identificación anticipada de riesgos, y asignación clara de responsabilidades, ocasiona que los proyectos se extiendan más allá de lo presupuestado, generándose efectos negativos sobre comunidades locales que esperan el uso de la infraestructura.

Según Peñaranda Pabón y Ravelo Pérez (2021) las entidades encargadas del control no siempre cuentan con los recursos técnicos tales como personal calificado, herramientas de inspección, capacidad de laboratorio y tampoco con los presupuestos necesarios. Eso reduce la supervisión efectiva de los materiales, de la ejecución conforme a especificaciones y de la adherencia a normas contractuales. Esto causa fallas técnicas, baja calidad en la ejecución y, en algunos casos, incumplimientos estructurales. Aunque Colombia tiene leyes, reglamentos y contratos públicos que buscan asegurar calidad, transparencia y control, su implementación sufre

por la dispersión de entidades con funciones similares, falta de coordinación interinstitucional, procedimientos duplicados o contradictorios. Todo esto ralentiza decisiones, hace que algunos contratos no tengan seguimiento oportuno, y abre espacios para que prácticas irregulares ocurran.

De acuerdo con Sarmiento Rojas et al. (2023) sin sistemas integrados que permitan recopilar, centralizar, procesar y actualizar datos en tiempo real, los informes de seguimiento llegan con retraso, tienen brechas de contenido o no reflejan la realidad del proyecto. Esto reduce la capacidad de anticipar riesgos, de reaccionar frente a imprevistos, y de garantizar transparencia frente a entidades vigilantes y beneficiarios.

Como señala Khan et al. (2024) hay una brecha notable en la formación de los profesionales encargados de control, supervisión y gestión de obras viales con metodologías modernas como BIM, IA, ciencia de datos. Esa falta de conocimientos limita la adopción efectiva de esas herramientas. Simultáneamente, hay una cultura institucional que tiende a apegarse a prácticas tradicionales, lo cual retrasa la modernización de los procesos y perpetúa ineficiencias.

1.2 La pregunta de investigación

¿Cómo una propuesta de estrategias desde la gestión de proyectos, orientada a la implementación de herramientas de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM, puede contribuir a mejorar los mecanismos de control y supervisión de proyectos de infraestructura vial en Colombia?

1.3 Los objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general

Proponer estrategias desde la gestión de proyectos para la implementación de herramientas basadas en IA, ciencia de datos y la metodología Building Information Modelling (BIM), orientadas a la optimización de los procesos de control en proyectos de construcción de infraestructura vial en Colombia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las principales limitaciones actuales en el control de los proyectos de infraestructura vial en Colombia, con base en información técnica, administrativa y legal.
- Determinar en qué estado se encuentra la aplicación de la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM en la gestión de proyectos de construcción a nivel internacional, nacional y local y qué estrategias se han desarrollado para la implementación de estos elementos.
- Diseñar una propuesta estratégica para la implementación gradual de tecnologías de IA, ciencia de datos y BIM que fortalezcan la eficiencia, transparencia y sostenibilidad de los proyectos de infraestructura vial en Colombia.

1.4 Justificación de la investigación

El control de los proyectos de infraestructura vial en Colombia ha sido históricamente uno de los puntos más débiles dentro de la gestión pública de obras. A pesar de que la administración vigente invierte cada año miles de millones de pesos en construcción y mantenimiento de carreteras, los resultados no siempre reflejan el esfuerzo financiero ni el impacto esperado en conectividad o productividad. En 2024, la Contraloría General de la República reportó más de 1.600 alertas relacionadas con irregularidades o retrasos en obras viales, con un valor total superior a los 70 billones de pesos (Revista Semana, 2024). Estas cifras coinciden con los planteado por Canales et al. (2023), quieres identifican que las deficiencias que existen en la planeación, los mecanismos de control y la falta de metodologías estandarizadas revelan un mismo patrón: los mecanismos tradicionales de control no están funcionando con la precisión ni la agilidad que requiere el país.

Si el seguimiento y la supervisión siguen dependiendo de procedimientos manuales o de reportes desactualizados, ¿cómo se puede garantizar que los recursos públicos se utilicen de forma eficiente? Este cuestionamiento es uno de los puntos de partida de la presente investigación. Serna et al. (2018) advierte que las debilidades institucionales, la fragmentación de los entres de control y la escasa coordinación entre ellos son factores que dificultan el logro de los objetivos de eficiencia y transparencia de la obra pública. En ese contexto, la IA, la ciencia de datos y la metodología (BIM) ofrecen alternativas reales para transformar la manera en que se planifica y supervisa la infraestructura vial. Según Flores y Ascaño (2025), el uso de algoritmos de aprendizaje automático y bases de datos integradas permite detectar desviaciones operativas

en etapas tempranas, reduciendo el margen de error y fortaleciendo la capacidad predictiva de los equipos de control.

En el ámbito internacional, se ha demostrado que los sistemas de análisis predictivo reducen hasta un 25 % los sobrecostos asociados a la mala planificación y mejoran en un 30 % el cumplimiento de los cronogramas (Attia, 2025). La experiencia de países como Finlandia y Corea del Sur, donde el uso combinado de BIM e IA ha sido obligatorio en proyectos públicos desde 2020, muestra que la tecnología no reemplaza al profesional, sino que amplía su capacidad de decisión. De manera similar, Rinchen et al. (2024) destacan que el uso sistemático de BIM en Europa ha facilitado la trazabilidad completa de decisiones técnicas y financieras, optimizando la interoperabilidad entre contratistas y supervisores. En América Latina, Soto (2018) identificó que la falta de herramientas tecnológicas y la gestión deficiente del cronograma son las principales causas de los retrasos en obras viales.

En el caso colombiano, Gordillo Chacón (2020) observó que las interventorías no cuentan con recursos tecnológicos suficientes ni con sistemas de información integrados, lo cual impide la supervisión en tiempo real y genera deficiencias en la gestión técnica. Estos hallazgos reflejan un sistema que aún depende de prácticas tradicionales, con limitada capacidad de control digital.

Desde el orden social, la relevancia de esta investigación radica en que las deficiencias en el control de proyectos viales no son un problema exclusivamente técnico o administrativo: sus consecuencias recaen directamente sobre las comunidades que dependen de la infraestructura para acceder a servicios de salud, educación, mercados y oportunidades de desarrollo. Cuando una obra vial se retrasa, se suspende o presenta fallas de calidad, son las poblaciones rurales y periféricas las que resultan más afectadas, al ser precisamente aquellas con menor acceso a vías

alternativas y con mayor dependencia de la conectividad vial para su integración económica y social. De acuerdo con el Ministerio de Transporte (2023), la inversión en infraestructura vial representa cerca del 3,5 % del PIB anual colombiano, recursos que en su mayor parte provienen de impuestos y regalías cuya administración eficiente es una obligación del Estado frente a la ciudadanía. En este sentido, fortalecer el control de estos proyectos mediante herramientas tecnológicas no es únicamente una mejora de gestión: es un acto de justicia social que garantiza que la inversión pública se traduzca en bienestar real y verificable para las comunidades beneficiarias. La propuesta que desarrolla esta investigación, al promover mayor transparencia, trazabilidad y eficiencia en la supervisión de las obras, contribuye a reducir los espacios para la corrupción y a fortalecer la confianza ciudadana en las instituciones responsables de la infraestructura del país.

Desde el punto de vista académico, esta investigación se inscribe en la línea de estudios aplicados a la gestión eficiente de proyectos públicos, integrando teorías de control, sistemas de información y análisis de datos. Sampieri (2018) resaltan que la coherencia metodológica es esencial para garantizar la validez de una investigación, especialmente cuando se abordan problemas complejos desde métodos mixtos. De igual forma, Gómez Cabrera et al. (2025) muestran cómo el uso de datos abiertos en proyectos de infraestructura educativa en Colombia permitió identificar patrones de desviación de tiempo y costo, lo que respalda la aplicabilidad de modelos predictivos en otros sectores como el vial.

Finalmente, Peñaranda Pabón y Ravelo Pérez (2021) subrayan que la eficacia del control de proyectos no depende únicamente del marco legal, sino también de la capacitación técnica y tecnológica de los equipos de interventoría. En esta línea, Marín (2019) argumenta que la gestión

de riesgos en infraestructura vial debe apoyarse en herramientas analíticas y modelos de simulación, capaces de anticipar fallas antes de que se conviertan en problemas financieros o técnicos.

La integración de estas perspectivas evidencia que la transformación digital del control de proyectos viales no es una opción futura, sino una necesidad presente. Las tecnologías emergentes ofrecen la posibilidad de pasar de un control reactivo a un sistema preventivo, transparente y sustentado en información verificable.

Desde el punto de vista del aporte sectorial, esta investigación busca ofrecer un marco práctico que sea replicable para el fortalecimiento del control en proyectos de infraestructura vial pública en Colombia. En primer lugar, su contribución académica radica en la integración de tres enfoques tecnológicos como son la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM bajo un esquema de análisis mixto, que puede ser adaptado a distintos contextos de obra, teniendo en cuenta que cada proyecto posee particularidades que los hacen únicos. En segundo lugar, su aporte institucional reside en la posibilidad de generar lineamientos que puedan orientar la modernización de los procesos de interventoría y fiscalización, apoyados en información en tiempo real. Finalmente, su impacto social se refleja en la mejora de la confianza ciudadana y en la eficiencia del gasto público, al promover obras terminadas en los plazos previstos y con la calidad esperada. Así, este estudio se proyecta como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas en el sector de la infraestructura vial, alineada con las necesidades actuales del país y los estándares internacionales de gestión pública eficiente.

2 MARCO DE REFERENCIA.

2.1 Marco de antecedentes

La revisión bibliográfica se desarrolló a partir de una ecuación de búsqueda estructurada con operadores booleanos, orientada a identificar investigaciones relacionadas con el control y monitoreo de proyectos de infraestructura vial mediante tecnologías digitales:

("project control" OR "project monitoring" OR "infrastructure project management")

AND ("road infrastructure" OR "highway construction" OR "transport infrastructure")

AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "data science" OR "predictive analytics" OR "big data" OR "Building Information Modeling" OR "BIM")

En idioma español se empleó la combinación:

("gestión de proyectos" OR "control de proyectos")

AND ("infraestructura vial" OR "obra pública")

AND ("inteligencia artificial" OR "ciencia de datos" OR "BIM")

La temporalidad de revisión comprendió el periodo 2016–2025, permitiendo capturar la evolución reciente de tecnologías aplicadas al sector vial. Las bases de datos consultadas incluyeron Scopus, Google Scholar, repositorios universitarios nacionales e internacionales y publicaciones técnicas de organismos multilaterales.

La literatura especializada evidencia que la gestión de proyectos de infraestructura vial ha transitado desde enfoques tradicionales centrados en el cumplimiento físico-contractual hacia esquemas integrados de control basados en datos, interoperabilidad digital y modelos predictivos.

En este contexto inicial, Berawi et al. (2016) desarrollaron un estudio aplicado a proyectos de carreteras de peaje en Indonesia, donde integraron modelos de simulación de rutas, análisis multicriterio y evaluación de riesgos financieros. Desde una perspectiva de gestión, su propuesta fortaleció la fase de planificación estratégica del ciclo de vida del proyecto, reduciendo incertidumbre en costos y cronogramas. Los autores demostraron que la aplicación de modelos cuantitativos en la estructuración técnica disminuye la probabilidad de modificaciones contractuales posteriores. Este antecedente resulta relevante porque evidencia que el control no debe limitarse a la fase de ejecución, sino que debe integrarse desde la estructuración del proyecto, bajo un enfoque preventivo.

Posteriormente, Cobo Pérez (2017) profundizó en la problemática de los sobrecostos en infraestructura pública latinoamericana, identificando como causa estructural la ausencia de sistemas automatizados de control físico-financiero. Desde una óptica de gobernanza, el autor planteó que la fragmentación de información genera asimetrías y reduce la capacidad de supervisión institucional. Propuso la implementación de plataformas digitales integradas capaces de cruzar variables contractuales, presupuestales y técnicas. Su aporte radica en vincular la eficiencia presupuestal con la calidad del sistema de información, estableciendo una relación directa entre trazabilidad de datos y desempeño del proyecto.

En continuidad con esta línea, Basnyat y Joshi (2020) evaluaron proyectos de infraestructura vial en Nepal mediante indicadores de desempeño (KPIs) asociados a avance físico, ejecución presupuestal y cumplimiento de cronograma. La investigación evidenció que la incorporación de tableros de control comparativos reduce desviaciones superiores al 15 % en cronogramas contractuales. Desde el enfoque de dirección de proyectos, el estudio refuerza la importancia del monitoreo continuo y del uso de métricas cuantificables para la toma de decisiones correctivas oportunas.

De manera complementaria, Afranio y Andrés (2021) analizaron la brecha tecnológica en América Latina, destacando la baja digitalización de los procesos de control en infraestructura pública. Los autores concluyeron que la región mantiene esquemas manuales de supervisión con limitada interoperabilidad entre entidades contratantes y ejecutoras. Desde una perspectiva sistémica, el estudio plantea que la transformación digital no es únicamente tecnológica, sino organizacional, ya que requiere rediseñar procesos, fortalecer competencias técnicas y establecer estándares de información.

En esa misma línea de modernización, Hinostroza et al. (2021) propusieron la implementación de la metodología BIM (Building Information Modeling) en proyectos viales peruanos. El estudio demostró que la modelación digital colaborativa mejora la coordinación interdisciplinaria y reduce interferencias constructivas, logrando disminuciones del 10,71 % en tiempo y mejoras en eficiencia presupuestal. Técnicamente, BIM permitió integrar diseño, programación y costos en un entorno digital único, fortaleciendo la trazabilidad del ciclo de vida del proyecto. Este antecedente evidencia el potencial de la interoperabilidad digital como herramienta de control integral.

En el contexto colombiano, Peñaranda Pabón y Ravelo Pérez (2021) analizaron la función de la interventoría en proyectos viales, identificando debilidades estructurales en capacidades técnicas y ausencia de plataformas digitales de seguimiento. Su investigación determinó que la supervisión tradicional presenta limitaciones para garantizar control oportuno de calidad y avance. Desde el enfoque de gobernanza pública, el estudio propone fortalecer competencias técnicas y adoptar herramientas tecnológicas para mejorar la transparencia y la eficiencia administrativa.

Avanzando hacia estudios más recientes, Canales et al. (2023) examinaron las causas de sobrecostos en proyectos del Caribe colombiano mediante análisis estadístico de contratos ejecutados. Los resultados evidenciaron que la ausencia de metodologías estandarizadas de control y la limitada digitalización inciden directamente en desviaciones presupuestales. El estudio propone integrar análisis predictivo y monitoreo continuo para reducir incertidumbre financiera, lo cual se alinea con enfoques contemporáneos de gestión basada en datos.

En paralelo, Sarmiento-Rojas et al. (2023) identificaron que la dispersión de bases de datos entre entidades públicas impide consolidar información confiable sobre avance físico y financiero. Su propuesta se centró en integrar plataformas georreferenciadas y sistemas de visualización digital que permitan monitoreo transversal. Desde la perspectiva de gestión de la información, este antecedente subraya la necesidad de interoperabilidad y estandarización de datos para mejorar la toma de decisiones.

Por su parte, Kussl y Wald (2023) realizaron una revisión sistemática sobre tecnologías de movilidad inteligente aplicadas a infraestructura vial. Identificaron el uso de sensores IoT, big data y analítica predictiva para monitoreo estructural y mantenimiento preventivo. Estas

tecnologías permiten identificar fallas en fases tempranas y optimizar recursos. El estudio aporta evidencia sobre cómo la digitalización avanzada puede transformar la supervisión tradicional hacia esquemas predictivos.

En un plano técnico más específico, Zhang (2023) abordó tecnologías inteligentes aplicadas a la construcción y mantenimiento de subrasantes en carreteras. Mediante sensores integrados y algoritmos de aprendizaje automático, se logró automatizar el control de calidad y reducir errores constructivos. Este enfoque introduce el componente de inteligencia artificial aplicada directamente al proceso constructivo, ampliando el espectro de control más allá del seguimiento administrativo.

Posteriormente, Herrera et al. (2024) desarrollaron una revisión sistemática sobre usos de BIM en proyectos viales, identificando 39 aplicaciones y 26 tecnologías complementarias como GIS y escaneo láser. Destacaron que la interoperabilidad mejora la trazabilidad durante todo el ciclo de vida del proyecto, fortaleciendo control, transparencia y sostenibilidad. Este estudio consolida la evidencia sobre la digitalización como eje estratégico de modernización sectorial.

A nivel macroregional, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2024) señaló que la brecha digital en infraestructura pública genera ineficiencias superiores al 20 % en ejecución presupuestal. El informe recomienda integrar tecnologías emergentes y fortalecer sistemas de información como estrategia de eficiencia fiscal y competitividad regional.

Finalmente, Gómez Cabrera et al. (2025) aplicaron modelos de analítica de datos en proyectos públicos colombianos, generando alertas tempranas sobre desviaciones de tiempo y

costo. Aunque el estudio se centró en infraestructura educativa, su metodología demuestra que la integración de plataformas abiertas y algoritmos predictivos puede fortalecer el control preventivo en cualquier sector, incluido el vial.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Gestión de proyectos

La gestión de proyectos se define como la aplicación sistemática de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas para cumplir con los requisitos del proyecto, particularmente en términos de alcance, tiempo, costo y calidad (Project Management Institute [PMI], 2021). Este enfoque integra procesos organizados en cinco grupos: inicio, planificación, ejecución, monitoreo y control, y cierre, los cuales permiten estructurar la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida del proyecto. De acuerdo con Bernal Torres (2022), una gestión de proyectos efectiva requiere no solo del cumplimiento de procedimientos formales, sino también de la capacidad institucional para adaptar los mecanismos de control a la complejidad y escala de cada intervención.

En el contexto de esta investigación, la gestión de proyectos constituye el marco conceptual integrador desde el cual se analizan las limitaciones del sector vial colombiano. Las deficiencias identificadas en los procesos de planificación, supervisión y control de obras no son fenómenos aislados, sino expresiones de debilidades estructurales en la forma en que se gestionan los proyectos públicos de infraestructura. Por ello, las estrategias propuestas se fundamentan en los principios de la gestión de proyectos como disciplina, buscando fortalecer específicamente los procesos de monitoreo y control mediante la incorporación de herramientas tecnológicas.

2.2.2 Control de proyectos de infraestructura vial

El control de proyectos corresponde al conjunto de procesos orientados a medir, evaluar y corregir el desempeño del proyecto en relación con los objetivos establecidos en términos de alcance, tiempo, costo y calidad (Gómez et al., 2023). En proyectos de infraestructura vial, este control implica la supervisión técnica, financiera y administrativa de la obra, e involucra a múltiples actores como contratistas, interventores y entidades contratantes, cuya coordinación efectiva es determinante para el éxito del proyecto. Egwim et al. (2023) señalan que la debilidad en los sistemas de control genera desviaciones significativas y pérdida de eficiencia, especialmente en proyectos de gran escala donde la complejidad técnica y la dispersión geográfica dificultan el seguimiento oportuno.

En Colombia, la interventoría es el mecanismo formal de control establecido por la normativa para garantizar el cumplimiento de los contratos de obra pública. Sin embargo, como señalan Peñaranda Pabón y Ravelo Pérez (2021), la eficacia de este mecanismo no depende únicamente del marco legal, sino también de la capacitación técnica y tecnológica de los equipos responsables. Experiencias como el programa de concesiones 4G evidencian que la ausencia de sistemas integrados de control puede generar inconsistencias entre actores, afectando la toma de decisiones y la transparencia del proceso. Este concepto constituye el eje central de la investigación, dado que el problema identificado se relaciona directamente con las limitaciones en los mecanismos de control de proyectos viales.

2.2.3 Infraestructura vial en Colombia

La infraestructura vial comprende el conjunto de obras, instalaciones y servicios necesarios para facilitar la movilidad de personas y mercancías a través del territorio, constituyendo uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico y social de cualquier nación (Ministerio de Transporte, 2023). En Colombia, la red vial nacional supera los 200.000 kilómetros, de los cuales una proporción

significativa se encuentra en condiciones deficientes de mantenimiento, lo que limita la conectividad regional y eleva los costos logísticos del país.

La gestión de la infraestructura vial en Colombia involucra a entidades como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), que lideran la planeación, contratación y supervisión de los proyectos más significativos del país. No obstante, Soto (2018) identificó que la falta de herramientas tecnológicas y la gestión deficiente del cronograma son las principales causas de los retrasos en obras viales en América Latina, situación que se replica con especial intensidad en el contexto colombiano. La comprensión de las particularidades de este sector, su escala, su complejidad contractual y su impacto social, es indispensable para contextualizar las estrategias tecnológicas propuestas en esta investigación y garantizar su pertinencia y aplicabilidad.

2.2.4 Transformación digital en el sector de la construcción

La transformación digital se refiere al proceso de incorporación de tecnologías digitales para mejorar la eficiencia, productividad y competitividad de las organizaciones, transformando no solo sus herramientas sino también sus modelos de gestión y cultura organizacional (Schwab, 2016). En el sector de la construcción, este proceso ha sido históricamente lento, posicionándose como uno de los sectores con menor nivel de digitalización a nivel global, situación que contrasta con el volumen de recursos que maneja y la complejidad de los proyectos que ejecuta.

En los últimos años se ha evidenciado una transición progresiva hacia modelos más digitalizados, impulsada por la necesidad de optimizar recursos, reducir riesgos y mejorar la transparencia en proyectos de gran escala. Según Rinchen et al. (2024), la digitalización del sector construcción no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la trazabilidad de las decisiones técnicas y financieras, lo que es especialmente relevante en el control de proyectos de infraestructura pública. Este concepto

enmarca la investigación dentro de una tendencia global, donde la transformación digital se convierte en una condición necesaria para modernizar los sistemas de control en proyectos viales y superar las limitaciones de los enfoques tradicionales de supervisión.

2.2.5 Building Information Modeling (BIM)

El Building Information Modeling (BIM) es una metodología que permite la creación y gestión de representaciones digitales de las características físicas y funcionales de una infraestructura a lo largo de su ciclo de vida (Castañeda et al., 2024). Su principal ventaja radica en la integración de información multidimensional: el modelo 3D incorpora la dimensión espacial, el 4D agrega la variable tiempo para la planificación del cronograma, y el 5D integra los costos, permitiendo una visión completa y actualizada del estado del proyecto en tiempo real. Esta capacidad de integración facilita la coordinación entre los diferentes actores del proyecto, reduciendo conflictos y errores que frecuentemente derivan en sobrecostos y retrasos.

Estudios como el de Samuelson y Stehn (2023) evidencian que la implementación integral de BIM puede reducir conflictos en obra hasta en un 35 %, mejorando significativamente la planificación y ejecución del proyecto. En países como Finlandia y Corea del Sur, el uso combinado de BIM e IA ha sido adoptado como estándar obligatorio en proyectos públicos, con resultados documentados en términos de reducción de sobrecostos y mejora en el cumplimiento de cronogramas (Flores & Ascaño, 2025). En el marco de esta investigación, BIM se plantea como una herramienta fundamental para fortalecer el control de obras viales en Colombia, al permitir la integración de información técnica, financiera y de cronograma en un entorno colaborativo y trazable.

2.2.6 Inteligencia artificial y ciencia de datos aplicadas a la gestión de proyectos

La inteligencia artificial (IA) comprende el conjunto de sistemas y algoritmos capaces de analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar predicciones o recomendaciones para apoyar la toma de decisiones (Russell & Norvig, 2021). En el ámbito de la gestión de proyectos, su aplicación permite anticipar desviaciones en cronogramas y costos, detectar anomalías en los procesos de ejecución y automatizar tareas de seguimiento que tradicionalmente demandan un esfuerzo manual considerable. Según Attia (2025), el uso de algoritmos de aprendizaje automático en proyectos de construcción puede reducir hasta un 25 % los sobrecostos asociados a la mala planificación y mejorar en un 30 % el cumplimiento de los cronogramas.

La ciencia de datos, por su parte, se enfoca en la extracción de conocimiento a partir de grandes volúmenes de información mediante técnicas estadísticas y computacionales (Provost & Fawcett, 2013). En proyectos de infraestructura, esta disciplina permite analizar indicadores de desempeño en tiempo real, construir modelos predictivos y generar visualizaciones que faciliten la interpretación de información compleja por parte de los equipos de control. La integración de la ciencia de datos con herramientas como BIM e IA genera un ecosistema tecnológico que transforma los datos operativos en información estratégica para la supervisión de las obras. Gómez Cabrera et al. (2025) han demostrado que el uso de datos abiertos en proyectos de infraestructura en Colombia permite identificar patrones de desviación de tiempo y costo, lo que respalda la aplicabilidad de estos modelos en el sector vial. Ambas tecnologías, la IA y la ciencia de datos, son el núcleo de la propuesta estratégica de esta investigación, al ofrecer capacidades de análisis predictivo y control inteligente que superan las limitaciones de los enfoques tradicionales de supervisión.

Desde una perspectiva integradora, la transformación digital de la gestión de proyectos requiere superar el uso aislado de herramientas tecnológicas. Zabala-Vargas y Jaimes-Quintanilla (2026) proponen un framework que articula sistemas ciberfísicos, analítica de datos e inteligencia artificial mediante una arquitectura multicapa y un flujo continuo de información que conecta captura, procesamiento, análisis y toma de decisiones. En este enfoque, tecnologías como BIM, IoT y la analítica avanzada conforman un ecosistema interoperable orientado a transformar los datos del proyecto en conocimiento útil para anticipar riesgos, optimizar recursos y fortalecer el control. Esta perspectiva resulta especialmente pertinente para proyectos de infraestructura vial, donde la integración y trazabilidad de la información constituyen condiciones esenciales para una supervisión efectiva.

2.3 Marco normativo

El marco jurídico que regula la infraestructura vial en Colombia establece lineamientos técnicos, administrativos y ambientales que orientan la planeación, ejecución y supervisión de proyectos.

La Ley 1682 de 2013 (Congreso de la República de Colombia, 2013) introdujo principios de sostenibilidad e innovación tecnológica en la gestión del transporte. Su artículo 4° promueve el uso de tecnologías inteligentes para garantizar eficiencia y trazabilidad en la construcción. El Decreto 1079 de 2015 (Presidencia de la República de Colombia, 2015), que compila la normativa del sector transporte, refuerza esta obligación al exigir mecanismos de control y supervisión acordes con estándares internacionales.

Por otra parte, la Ley 1228 de 2008 (Congreso de la República de Colombia, 2008) creó el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras (SINC), concebido como una base de datos centralizada para la gestión de información vial. Sin embargo, el sistema ha tenido una implementación parcial, lo que confirma la brecha entre norma y práctica. En el ámbito técnico, las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS (Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], 2024) definen los criterios de calidad y control que deben cumplirse en cada etapa constructiva, desde la selección de materiales hasta las pruebas de laboratorio.

Finalmente, el Plan Maestro de Transporte Intermodal 2021–2035 (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2021) introduce el concepto de interoperabilidad entre entidades y fomenta el uso de plataformas tecnológicas para monitorear obras en tiempo real. Estos instrumentos normativos delinean el terreno sobre el cual debe operar cualquier propuesta que busque incorporar IA, ciencia de datos o BIM al control de proyectos. No se trata de reemplazar las normas, sino de darles soporte digital que asegure su cumplimiento y facilite la supervisión.

3 METODOLOGÍA

3.1 Enfoque y alcance de la investigación

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, orientado a la medición sistemática de variables relacionadas con el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia. Esta elección responde a la naturaleza del problema de investigación, el cual requiere identificar patrones medibles de desviación en costos y tiempos, cuantificar el nivel de adopción tecnológica en los procesos de interventoría y establecer relaciones estadísticas entre variables que permitan fundamentar propuestas de mejora basadas en evidencia empírica.

El enfoque cuantitativo permite recopilar datos estructurados a partir de instrumentos estandarizados, procesarlos mediante técnicas estadísticas y obtener resultados replicables y comparables entre diferentes proyectos y actores del sector. De acuerdo con Sampieri et al. (2018), este enfoque es pertinente cuando el objetivo es medir con precisión fenómenos observables, establecer relaciones entre variables y generalizar conclusiones a partir de una muestra representativa. En el contexto de la gestión de proyectos viales, donde existen variables objetivas como presupuestos, cronogramas e indicadores de cumplimiento, el enfoque cuantitativo constituye la aproximación metodológica más adecuada para diagnosticar las

limitaciones actuales y evaluar el potencial de herramientas tecnológicas como la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM (Bernal Torres, 2022).

El presente estudio se ajusta a los proyectos de infraestructura vial desarrollados en Colombia entre los años 2023 y 2025, periodo que coincide con la implementación progresiva de estrategias nacionales de conectividad y programas de inversión pública como el Plan Maestro de Transporte Intermodal y las concesiones de cuarta y quinta generación (4G y 5G). Este rango temporal se selecciona por representar una etapa de transición tecnológica y metodológica en la planificación y ejecución de obras, en la que el uso de herramientas digitales comenzó a tener relevancia, pero sin consolidarse plenamente como política de control o seguimiento. En cuanto al período de ejecución de la investigación, esta se desarrollará entre el segundo semestre de 2025 y el primer semestre de 2026, abarcando las fases de revisión documental, recolección de datos, análisis y formulación de resultados.

El alcance espacial abarca el nivel nacional, con énfasis en proyectos de infraestructura vial a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), así como en concesiones departamentales y municipales que reflejan distintos niveles de capacidad técnica y de control. Estos proyectos constituyen una muestra representativa del sistema vial colombiano, caracterizado por la heterogeneidad en la gestión, la dispersión geográfica y la presencia de dificultades en el cumplimiento de los cronogramas y presupuestos.

En cuanto al alcance temático, la investigación se centra en el control y supervisión de los proyectos de infraestructura vial, con énfasis en los factores que inciden en la desviación de costos y tiempos, la deficiencia en los mecanismos de interventoría y la falta de integración tecnológica en los sistemas de información. Se analizará cómo la aplicación de herramientas

como la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM pueden fortalecer las capacidades institucionales para la gestión de riesgos, la trazabilidad de decisiones y la transparencia en la ejecución contractual.

El estudio no pretende abarcar todas las fases del ciclo de vida del proyecto, sino que se enfoca en la etapa de ejecución y control, donde se concentran los mayores desafíos técnicos y administrativos. Esta delimitación responde a la necesidad de ofrecer resultados aplicables a corto y mediano plazo, orientados a la toma de decisiones en los procesos de interventoría, fiscalización y auditoría de obras.

La relevancia del alcance definido radica en que el sector de la infraestructura vial representa una de las mayores inversiones públicas del país, cercana al 3,5 % del PIB anual, y constituye un motor de desarrollo económico y social (Ministerio de Transporte, 2023). No obstante, los indicadores de sobrecostos, demoras y fallas de calidad evidencian deficiencias estructurales que requieren soluciones basadas en conocimiento técnico y herramientas tecnológicas que aumenten la eficiencia del control público (Peñaranda & Ravelo, 2021).

3.2 Población y muestra

3.2.1 Definición de la población

La población objeto de estudio estará compuesta por profesionales vinculados al control y supervisión de proyectos de infraestructura vial en Colombia, incluyendo ingenieros residentes, jefes de interventoría, directores técnicos y funcionarios de entidades contratantes pertenecientes

a entidades como el INVIAS, la ANI y contratistas privados con experiencia en proyectos ejecutados entre 2023 y 2025 en los departamentos de Risaralda, Caldas, Putumayo y Huila, seleccionados por su relevancia económica y por la presencia de problemáticas de control documentadas por la Contraloría General de la República.

Criterios de inclusión de participantes:

- Profesional con título en ingeniería civil, arquitectura o áreas afines a la construcción o gestión de infraestructura.
- Experiencia mínima de dos años en roles de interventoría, supervisión, gerencia o auditoría de proyectos de infraestructura vial.
- Vinculación activa o reciente (no mayor a dos años) con proyectos viales en Colombia durante el período 2023–2025.
- Disposición voluntaria para participar en el estudio mediante la firma del consentimiento informado.

Criterios de exclusión de participantes:

- Profesionales cuya experiencia esté limitada exclusivamente a proyectos de construcción de edificaciones u obras distintas a infraestructura vial.
- Participantes que no completen el cuestionario en su totalidad, ya que las respuestas parciales no permiten un análisis estadístico consistente.
- Personas que no cuenten con experiencia directa en procesos de control, supervisión o interventoría, independientemente de su formación académica.

Dado el carácter cuantitativo de la investigación, se aplicará un muestreo no probabilístico por conveniencia, buscando obtener entre 50 y 100 respuestas válidas al cuestionario estructurado, cantidad que permitirá realizar análisis estadísticos descriptivos y correlacionales con suficiente poder explicativo. Esta muestra garantizará diversidad institucional y territorial, lo que fortalecerá la representatividad de los resultados obtenidos (Sampieri et al., 2018).

3.2.2 Cálculo y selección de la muestra

Fórmula de Cálculo

Para determinar el tamaño de la muestra, se empleó una calculadora en línea ofrecida por la plataforma QuestionPro, la cual permitió establecer el número adecuado de participantes para el estudio.

Fórmula utilizada

Tamaño de la muestra = Z2 * (P) * (1 – P) / C2

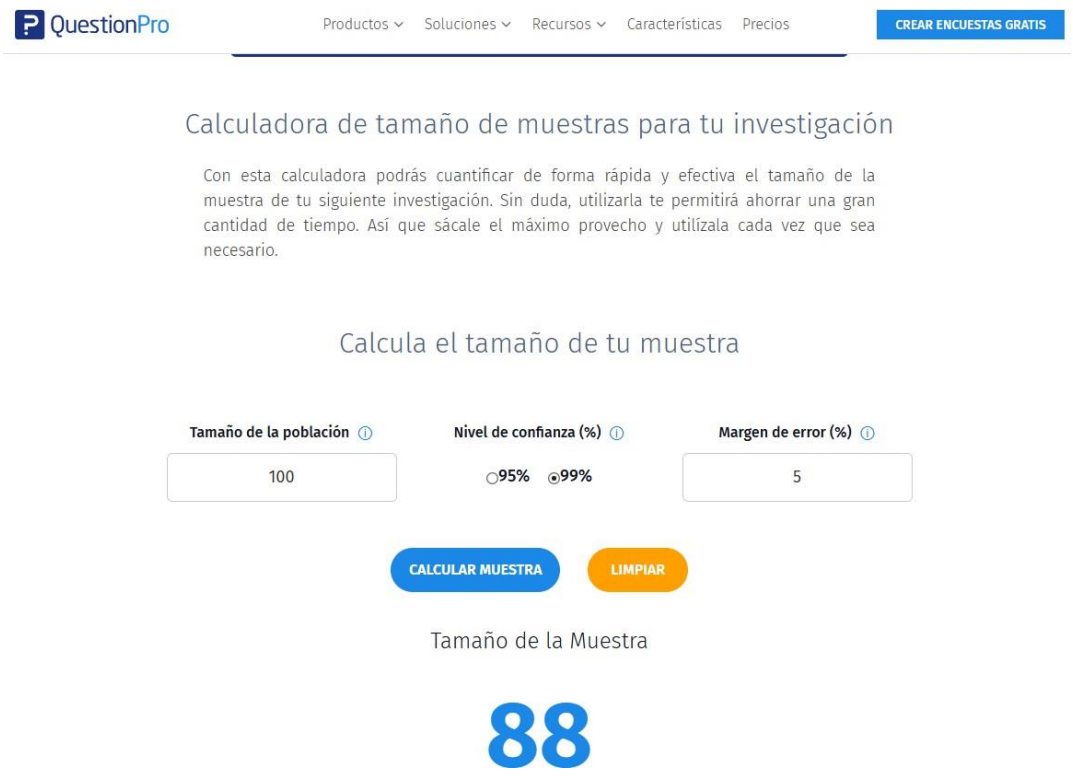
Donde:

Z: Nivel de confianza (1,96 para 95% o 2.5 para el 99%)

P: Proporción estimada (0,5)

C: Margen de error (5%)

Ilustración 1 Cálculo del tamaño de muestra



Nota. Tomado de Software para encuestas QuestionPro (2026).

El análisis efectuado mediante el software QuestionPro arrojó que la muestra óptima para este proyecto sería de 88 empresas. Sin embargo, considerando las particularidades del proyecto nodo y los propósitos específicos de esta investigación, el estudio se enfocará en 73 empresas pertenecientes al sector de la ingeniería y ramas relacionadas. Dicha selección tiene como fin recopilar información pertinente y representativa que permita dar respuesta a los objetivos establecidos en el trabajo investigativo.

3.3 Instrumentos

Esta etapa se desarrolla a través de dos procedimientos complementarios entre sí. En primer lugar, se realiza una revisión sistemática de la literatura, la cual consiste en la búsqueda, selección y análisis de fuentes bibliográficas relevantes, tales como artículos científicos, informes técnicos y publicaciones especializadas, con el fin de construir un marco teórico sólido que respalde la investigación.

En segundo lugar, se aplica una encuesta orientada a evaluar el nivel de madurez tecnológica de las empresas objeto de estudio. Este instrumento permite identificar el estado actual en que se encuentran las organizaciones frente a la adopción e implementación de tecnologías relacionadas con el tema de investigación, proporcionando datos cuantitativos y cualitativos que enriquecen el análisis y facilitan la toma de decisiones basada en evidencia.

3.3.1 Revisión sistemática de la Literatura

Este proceso se sustenta en el estudio y análisis de diversas fuentes científicas de alto impacto, a partir de las cuales se construye una matriz de análisis bibliográfico. Dicha matriz constituye una herramienta estructurada que permite organizar y clasificar la información recopilada mediante campos específicos, facilitando una revisión ordenada, rigurosa y coherente con los objetivos de la investigación.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizó la plataforma Scopus, reconocida a nivel mundial por su amplia cobertura de publicaciones científicas y académicas indexadas. Las categorías definidas dentro de la matriz y los datos extraídos de cada fuente son los siguientes:

- Autores: Se registran los nombres completos de los autores responsables de cada publicación consultada.
- Título del artículo: Se indica el título y la tipología del documento revisado.
- Año de publicación: Se consigna el año en que fue publicado el artículo, lo que permite identificar la vigencia y evolución del tema en el tiempo.
- Número de citaciones: Refleja la cantidad de veces que el artículo ha sido referenciado por otros autores, siendo un indicador de su relevancia e impacto en la comunidad científica.
- Tipo de documento: Se clasifica la naturaleza del documento, pudiendo ser artículo original, artículo de revisión, ponencia de conferencia, entre otros.
- Síntesis del artículo: Se elabora un resumen conciso del contenido principal del documento, destacando sus ideas centrales y contribuciones al campo de estudio.
- Metodología utilizada: Se describe el enfoque metodológico empleado en cada investigación, incluyendo los casos de estudio y los procedimientos aplicados.
- Instrumentos aplicados: Se identifican las herramientas, técnicas e instrumentos utilizados por los autores para el desarrollo de su investigación.
- Tipo de tecnología: Se clasifican las tecnologías emergentes abordadas en cada documento, tales como Big Data, Ciencia de Datos, Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas (IoT), entre otras.

- Resultados principales: Se extraen los hallazgos y datos más relevantes del artículo que aporten directamente al tema de investigación.
- Aportes relevantes a la temática del proyecto: Se establece la relación entre los aportes y conclusiones de cada documento con los objetivos y alcances del presente estudio.

3.3.2 Encuesta sobre el nivel de Madurez Tecnológica

Con el propósito de recopilar información pertinente para el desarrollo de esta investigación, se diseñó y aplicó un instrumento de recolección de datos conformado por 32 preguntas, dirigido a 73 empresas pertenecientes al sector de la construcción y sectores afines. Dicho instrumento fue estructurado bajo la escala de medición Likert, la cual permite evaluar de manera gradual el nivel de adopción e implementación de tecnologías emergentes al interior de las organizaciones participantes, ofreciendo así una visión cuantitativa y comparativa del estado de madurez tecnológica en el sector.

Las preguntas que componen la encuesta fueron organizadas y agrupadas en cinco áreas temáticas fundamentales, cada una orientada a explorar dimensiones específicas de la transformación digital empresarial:

I. Modelo de negocio: Evalúa de qué manera las empresas han incorporado las tecnologías emergentes en su propuesta de valor, estructura organizacional y fuentes de ingresos.

II. Clientes y proveedores: Analiza el nivel de integración tecnológica en la gestión de relaciones con clientes y en la cadena de suministro con proveedores.

III. Procesos a nivel táctico y operativo: Examina el grado de digitalización y automatización de los procesos internos, tanto en la planificación táctica como en la ejecución operativa del negocio.

IV. Infraestructura y seguridad: Indaga sobre la capacidad tecnológica instalada en las empresas, así como las medidas adoptadas para garantizar la seguridad de la información y la continuidad de sus operaciones digitales.

V. Estrategia y experiencia en la Industria 4.0: Explora el nivel de conocimiento, visión estratégica y experiencia que tienen las organizaciones frente a los principios y tecnologías asociadas a la cuarta revolución industrial.

Cabe destacar que el detalle completo de cada una de las preguntas incluidas en el instrumento de medición del nivel de madurez tecnológica se encuentra disponible en el **Anexo 1**, el cual constituye un recurso de consulta complementario para comprender el alcance y la profundidad del instrumento aplicado en este proyecto.

3.4 Descripción de procedimientos

En el marco de esta investigación, se desarrolló un instrumento de encuesta orientado a explorar y determinar los usos, aplicaciones y beneficios que ofrecen las tecnologías emergentes, particularmente la Inteligencia Artificial (IA) y el Big Data, en la gestión integral de proyectos de construcción en los departamentos de Norte de Santander, Santander y Cesar, en Colombia. La muestra seleccionada comprende 43 empresas del sector constructor, elegidas de manera

estratégica con el fin de asegurar una representación equilibrada de la industria y garantizar que los hallazgos obtenidos sean pertinentes y aplicables al contexto regional.

El proceso de recolección de datos se estructuró en las siguientes etapas:

Contacto inicial: Se estableció comunicación con las empresas participantes mediante el envío de correos electrónicos y la realización de llamadas telefónicas dirigidas a los responsables de la gestión de proyectos. En este primer acercamiento, se les informó sobre los objetivos, el alcance y la relevancia de la investigación, al tiempo que se les proporcionó una introducción general acerca del papel de las tecnologías emergentes en el sector de la construcción y su potencial impacto en la productividad y competitividad empresarial.

Instrucciones y dinámica: Cada participante recibió un correo electrónico detallado que contenía una carta formal de presentación del proyecto, una descripción clara del propósito de la encuesta y las instrucciones necesarias para su correcto diligenciamiento. Asimismo, se enfatizó que la participación era completamente voluntaria y que toda la información suministrada sería tratada con estricta confidencialidad y anonimato, en cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Entrega de la encuesta: El instrumento fue distribuido de forma digital a través de la plataforma Microsoft Forms, seleccionada por su accesibilidad, facilidad de uso y la posibilidad de que los participantes pudieran completarla en el momento y lugar que consideraran más conveniente, sin restricciones de horario ni ubicación geográfica.

Recolección de datos: La información fue registrada de manera automática a medida que los participantes completaban la encuesta en línea. Se estableció un período de dos semanas para

la recolección de respuestas, durante el cual se enviaron recordatorios periódicos vía correo electrónico con el propósito de incentivar la participación y garantizar el cumplimiento de la fecha límite establecida.

Análisis de la información: Una vez finalizada la recolección, los datos fueron exportados a una hoja de cálculo en Microsoft Excel para su organización y procesamiento. Se aplicaron herramientas de análisis descriptivo que permitieron identificar tendencias, patrones y correlaciones entre las variables estudiadas, logrando así una comprensión más profunda y detallada sobre la manera en que la Inteligencia Artificial y el Big Data están siendo incorporados en la gestión de costos, tiempos y recursos en los proyectos de construcción de la región.

A partir de los resultados obtenidos en este proceso, se buscó identificar las estrategias más eficientes y viables para la integración de tecnologías emergentes en el sector de la construcción. El propósito central de esta investigación es contribuir a la optimización de la administración de proyectos, mediante la reducción de costos y tiempos de ejecución, así como el fortalecimiento de la toma de decisiones sustentada en datos confiables y oportunos, impulsando de esta manera la transformación digital del sector en la región.

3.4.1 Fase 1: Revisión de la literatura

Para el desarrollo de la revisión sistemática de literatura que sustenta esta investigación, se recurrió a Scopus, una de las bases de datos bibliográficas más completas y reconocidas a nivel mundial, la cual agrupa una amplia colección de publicaciones científicas, artículos de

investigación, revisiones académicas y ponencias de conferencias indexadas en diversas áreas del conocimiento. La elección de esta plataforma se fundamentó en su rigor académico, su amplia cobertura temática y la confiabilidad de las fuentes que alberga, lo que garantizó la calidad y pertinencia de la información recopilada para los propósitos de este estudio.

El proceso llevado a cabo para la identificación, selección y análisis de las publicaciones más relevantes sobre el tema de investigación se desarrolló mediante una serie de pasos sistemáticos y estructurados, los cuales se describen a continuación:

3.4.1.1 Preguntas de investigación

El punto de partida de este proceso consistió en la formulación y definición de las preguntas centrales que orientarían el desarrollo de toda la investigación. Esta etapa resultó fundamental, dado que las preguntas de investigación constituyen el eje rector que guía la búsqueda, selección y análisis de la literatura científica, asegurando que los esfuerzos de revisión bibliográfica estuvieran alineados con los objetivos planteados en el estudio.

Para ello, se realizó una reflexión profunda sobre la problemática abordada, considerando los vacíos existentes en el conocimiento, las necesidades del sector de la construcción en la región y el papel que desempeñan las tecnologías emergentes en la transformación digital de la industria. De esta manera, las preguntas definidas permitieron delimitar el alcance de la revisión bibliográfica y enfocar la búsqueda hacia publicaciones científicas de alta relevancia y pertinencia para los propósitos de esta investigación.

Preguntas de la investigación:

¿Cuál es el nivel de adopción de herramientas de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en las empresas del sector de infraestructura vial en Colombia? ¿De qué manera estas tecnologías han sido aplicadas en el control y seguimiento de proyectos viales en el contexto latinoamericano y colombiano? ¿Qué estrategias de gestión de proyectos han demostrado mayor efectividad en la implementación de estas herramientas dentro del sector de la construcción? ¿Cómo han contribuido la inteligencia artificial y la ciencia de datos a la optimización de costos y tiempos en proyectos de infraestructura vial?

3.4.1.2 Ecuación de búsqueda en Scopus

Para la revisión sistemática de literatura se empleó Scopus como fuente principal de consulta, plataforma reconocida a nivel mundial por su amplia cobertura de publicaciones científicas indexadas y la confiabilidad de sus fuentes. La estrategia de búsqueda fue diseñada de manera estructurada, utilizando palabras clave, operadores booleanos y filtros de refinamiento orientados a identificar las publicaciones más relevantes vinculadas con la integración de tecnologías emergentes en la gestión de proyectos de infraestructura vial. A continuación, se describe la estrategia de consulta utilizada:

Consulta: ("project control" OR "project monitoring" OR "infrastructure project management") AND ("road infrastructure" OR "highway construction" OR "transport infrastructure") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "data science" OR "predictive analytics" OR "big data" OR "Building Information Modeling" OR "BIM")

Periodo: 2016 a 2024

Tipos de documentos: artículos científicos, revisiones de literatura y capítulos de libros.

3.4.1.3 Análisis bibliométrico

Para el desarrollo del análisis bibliométrico, se tuvieron en cuenta una serie de indicadores cuantitativos y cualitativos que permitieron caracterizar el comportamiento y la evolución de la producción científica relacionada con el tema de investigación. Los aspectos considerados fueron los siguientes:

- Publicaciones por año: Se examinó la distribución temporal de las publicaciones con el fin de identificar las tendencias y el crecimiento del interés científico en torno a la temática a lo largo del tiempo, permitiendo reconocer los períodos de mayor producción académica y los momentos de mayor impulso investigativo.
- Publicaciones por país: Se analizó la procedencia geográfica de los documentos consultados, lo que permitió identificar los países con mayor contribución al campo de estudio y establecer el nivel de desarrollo e interés regional y global frente a la integración de tecnologías emergentes en la gestión de proyectos de construcción.
- Principales filiaciones institucionales: Se identificaron las universidades, centros de investigación y organizaciones con mayor producción científica sobre el tema, lo cual permitió reconocer los referentes académicos e institucionales más influyentes en el área de estudio.
- Principales autores de referencia: Se determinaron los autores con mayor número de publicaciones e impacto en la temática, considerando su producción académica y el

número de citaciones recibidas, lo que facilitó la identificación de los referentes teóricos más relevantes para esta investigación.

3.4.2 Medición del nivel de madurez tecnológico

3.4.2.1 Preguntas sobre el modelo de negocio y producto

- Cuenta con una estrategia de transformación digital formulada desde la alta dirección.
- Cuenta con indicadores para medir el nivel de transformación digital.
- Tiene interés en la capacitación del talento humano en transformación digital.
- Algunos de sus productos integran tecnologías emergentes (inteligencia artificial, big data o ciencia de datos).
- Reconoce la importancia que tiene el uso y análisis de la información.
- Identifica que el desarrollo y la innovación tecnológica juegan un papel importante.
- Cuenta con claridad en los procesos y protocolos para llevar a cabo proyectos con alta incorporación tecnológica.
- Reconoce los conceptos de tecnologías emergentes (inteligencia artificial, big data y data science).

3.4.2.2 Preguntas sobre inversiones del pasado en los últimos dos años

- Investigación y desarrollo.
- Producción de productos o servicios.

- Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano).
- Logística de recepción y distribución.
- Comercial y ventas.
- Sistemas de información (herramientas software).

3.4.2.3 Preguntas sobre inversiones futuras en aspectos tecnológicos

- Investigación y desarrollo.
- Producción de productos o servicios.
- Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano).
- Logística de recepción y distribución.
- Comercial y ventas.
- Sistemas de información (herramientas software).

3.4.2.4 Preguntas sobre clientes y proveedores

- Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de proveedores.
- Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de clientes.
- Analiza información de sus clientes para generar o mejorar productos o servicios.
- Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus clientes.
- Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus proveedores.

- Cuenta con la planificación y dirección de la cadena de suministros desde los clientes hasta los proveedores.
- Digitalización de trabajo con clientes.
- Digitalización de trabajo con proveedores.
- Intercambio de información digitalmente con socios, proveedores y clientes.
- Uso de múltiples canales de venta integrados para comercializar sus productos a sus clientes.
- Sistema de precios dinámico y adaptado al cliente.
- Analiza los datos de los clientes para aumentar su conocimiento (situación personal, preferencias, ubicación, puntuación crediticia).
- Diseña soluciones considerando los datos de los clientes.

3.4.2.5 Preguntas sobre procesos a nivel táctico y operativo

- ¿Cuál es la tecnología utiliza en su organización?
- Las máquinas y sistemas se pueden controlar a través de tecnologías.
- Comunicación entre máquinas / sistemas - M2M.
- Capacidad de integrarse y colaborar con otras máquinas / sistemas - interoperabilidad.
- Su empresa realiza: (producción de bienes o prestación de servicio)

3.4.2.6 Preguntas para organizaciones dedicadas a producir bienes o productos

- Tiene una visión en tiempo real de su producción.

- Su producción es lo suficientemente flexible para reaccionar a cambios en la demanda.
- Registra datos de máquinas o equipos.
- Registra datos de sus procesos de producción.
- Aprovecha los datos para tomar decisiones en el proceso de producción.
- Integración de tecnologías digitales en el proceso de producción.
- Usa herramientas digitales para mejorar la eficiencia en la producción.
- Digitalización de la gestión de inventarios y recursos.

3.4.2.7 Preguntas para organizaciones dedicadas a la prestación de servicios

- Nivel de integración de tecnologías digitales en la prestación de nuestros servicios.
- Uso de herramientas digitales para mejorar la eficiencia en la prestación de servicios.
- Registran datos o información del proceso de prestación de servicios.
- Aprovecha los datos y análisis digitales para tomar decisiones en la prestación de servicios.
- Nivel de adopción de tecnologías de automatización en la entrega de servicios.
- Digitalización de la gestión de datos y registros en nuestra empresa de servicios.

3.4.2.8 Preguntas sobre infraestructura y seguridad

- Sistemas para comunicarse con otras áreas de la organización, utiliza sistemas de información.
- Sistema para comunicarse con clientes y proveedores, utiliza sistemas de información.

- ¿La organización , ya está utilizando servicios en la nube?
- ¿Cómo está organizada su gestión en tecnologías de la información - TI?
- Nivel de cumplimiento de estos criterios en su organización
- La información de su organización se encuentra segura en el contexto de la transformación digital.
- Realiza evaluaciones y auditorías de seguridad de la información en su organización como parte de la estrategia de transformación digital.
- Promueve la conciencia y la capacitación en seguridad de la información entre los empleados de acuerdo a la transformación digital.
- Las medidas de respuesta ante incidentes de seguridad de la información en su organización son efectivas

3.4.2.9 Preguntas sobre estrategia y experiencia en la industria 4.0

- ¿Cómo realiza la organización el registro de la información generada por los procesos (producción, comercial, calidad, mantenimiento, administración, etc.)?
- ¿Dispone de alguna persona en la organización responsable de la transformación digital?
- ¿Cómo evalúa las capacidades de sus empleados en relación con los requisitos futuros de la Industria 4.0?
- ¿En qué medida ha abordado las ineficiencias de los procesos mediante la adopción de sistemas inteligentes (máquinas inteligentes, tecnología digital integrada)?

- ¿Cuál es la ambición estratégica de la organización con respecto al paso a la Industria 4?0?
- ¿Qué nivel de importancia tienen en la organización, como elemento diferenciador en el sector, las soluciones y tecnologías relacionadas con los siguientes habilitadores de Industria 4.0?

3.5 Análisis de información

El análisis de información se desarrolló de manera diferenciada según la naturaleza de los datos provenientes de cada instrumento. En consecuencia, no se aplicó un único procedimiento general para toda la información recolectada, sino que se establecieron fases específicas para la revisión sistemática de literatura y para la encuesta de madurez tecnológica.

La revisión sistemática de literatura produjo información documental, principalmente de carácter cualitativo y bibliométrico, relacionada con antecedentes, enfoques de investigación, tecnologías aplicadas y estrategias de implementación. En cambio, la encuesta de madurez tecnológica generó datos cuantitativos estructurados, derivados de preguntas cerradas y escalas de valoración, los cuales fueron procesados mediante estadística descriptiva.

De acuerdo con lo anterior, el análisis se organizó en cuatro momentos: limpieza, organización y preparación de los datos; codificación de la información; análisis según el instrumento; y presentación de los resultados.

Limpieza, organización y preparación de los datos

Para la revisión sistemática de literatura, la limpieza de la información consistió en depurar los registros obtenidos en Scopus, eliminando documentos duplicados, publicaciones sin relación directa con el objeto de estudio, fuentes que no abordaran tecnologías emergentes aplicadas a la gestión de proyectos o documentos que no cumplieran con el periodo de análisis definido. Esta fase permitió consolidar un conjunto de fuentes pertinentes para el desarrollo del marco de antecedentes y el análisis del estado actual del conocimiento.

Posteriormente, los documentos seleccionados fueron organizados en una matriz de análisis bibliográfico. Esta matriz permitió registrar y comparar información relevante de cada fuente, incluyendo autor, año, título, tipo de documento, número de citaciones, metodología utilizada, tecnología abordada, resultados principales y aporte a la investigación. A diferencia de la encuesta, esta información no fue preparada como base estadística de respuestas individuales, sino como insumo documental para identificar tendencias, enfoques y categorías temáticas.

Para la encuesta de madurez tecnológica, la limpieza de datos inició con la revisión de la base exportada desde la plataforma digital utilizada para la aplicación del cuestionario. En esta etapa se verificó la completitud de las respuestas, la coherencia de los registros y la correspondencia de los participantes con el sector de análisis. Del total de respuestas recopiladas, se seleccionaron aquellas correspondientes al sector de construcción e ingeniería, por ser las directamente relacionadas con el objeto de estudio.

Una vez depurada la base, la información fue organizada en Microsoft Excel, estructurando las respuestas por pregunta, variable, dimensión temática y participante. Esta organización permitió consolidar una matriz de datos cuantitativos adecuada para el cálculo de

frecuencias, porcentajes y distribuciones de respuesta. En esta fase también se revisó la consistencia de las opciones seleccionadas y se agruparon las respuestas de acuerdo con las categorías previamente definidas en el instrumento.

3.5.1 Codificación de la información

La codificación de la información se realizó de manera diferenciada según el tipo de instrumento. En el caso de la revisión sistemática de literatura, la codificación fue temática y documental. Las fuentes seleccionadas fueron clasificadas en categorías relacionadas con control de proyectos, infraestructura vial, inteligencia artificial, ciencia de datos, BIM, transformación digital, interoperabilidad, gestión de riesgos, análisis predictivo, madurez tecnológica y gestión de información.

Esta codificación permitió identificar patrones conceptuales y agrupar los aportes de los autores según su relación con los objetivos específicos de la investigación. De esta manera, los documentos revisados no fueron analizados únicamente como referencias aisladas, sino como evidencia organizada sobre el estado de aplicación de tecnologías emergentes en el control de proyectos.

En el caso de la encuesta, la codificación fue cuantitativa. Las respuestas cerradas fueron convertidas en categorías operativas que permitieron su procesamiento estadístico. Las preguntas con escala tipo Likert fueron codificadas de acuerdo con el nivel de valoración seleccionado por los participantes, permitiendo identificar grados de adopción, implementación, importancia o cumplimiento. Las preguntas de selección múltiple fueron codificadas a partir de la frecuencia de elección de cada alternativa.

Cuando el instrumento incluyó opciones abiertas o campos descriptivos, estas respuestas fueron revisadas y agrupadas en categorías generales para apoyar la interpretación de los resultados. No obstante, dado que el enfoque principal del estudio es cuantitativo, estas respuestas no constituyeron una fase independiente de análisis cualitativo, sino un complemento interpretativo frente a los resultados estadísticos.

3.5.2 Análisis de los datos según el instrumento

Para la revisión sistemática de literatura, el análisis se realizó mediante una lectura analítica, comparativa y temática de los documentos seleccionados. Este procedimiento permitió identificar tendencias investigativas, tecnologías con mayor presencia en la literatura, enfoques metodológicos utilizados, beneficios reportados, limitaciones de implementación y estrategias aplicadas en diferentes contextos.

Adicionalmente, el análisis bibliométrico permitió observar la evolución temporal de las publicaciones, los países con mayor producción académica, los autores de referencia y las principales filiaciones institucionales. Estos elementos contribuyeron a establecer el estado actual del conocimiento frente a la aplicación de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en la gestión y control de proyectos de infraestructura.

Para la encuesta de madurez tecnológica, el análisis se desarrolló mediante estadística descriptiva en Microsoft Excel. Se calcularon frecuencias absolutas, porcentajes y distribuciones de respuesta para cada una de las variables evaluadas. Este procesamiento permitió identificar el nivel de adopción tecnológica de las organizaciones, la existencia de sistemas de información, el

uso de servicios en la nube, la disponibilidad de talento humano especializado, el grado de digitalización de procesos y la percepción de importancia de las tecnologías emergentes.

Asimismo, se realizaron comparaciones entre las dimensiones del instrumento, tales como modelo de negocio, clientes y proveedores, procesos tácticos y operativos, infraestructura y seguridad, y estrategia frente a la Industria 4.0. Estas comparaciones permitieron interpretar las brechas de madurez tecnológica y relacionarlas con la viabilidad de implementar herramientas de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en el control de proyectos de infraestructura vial.

3.5.3 Presentación de los resultados

Los resultados derivados de la revisión sistemática de literatura se presentan mediante síntesis descriptivas, tablas de clasificación y análisis comparativos. Estos recursos permiten mostrar las principales tendencias identificadas, los enfoques tecnológicos predominantes, los beneficios reportados en la literatura y las limitaciones asociadas a la implementación de herramientas digitales en proyectos de infraestructura.

Los resultados derivados de la encuesta se presentan mediante tablas y gráficas elaboradas a partir de las frecuencias y porcentajes obtenidos en el procesamiento de datos. Estas representaciones permiten visualizar de forma clara el comportamiento de las variables analizadas, tales como adopción tecnológica, digitalización de procesos, uso de sistemas de información, seguridad tecnológica, capacidades organizacionales y percepción frente a la Industria 4.0.

La presentación de resultados se estructura de acuerdo con las dimensiones del instrumento y se articula con los objetivos específicos de la investigación. De esta manera, los resultados no se exponen como datos aislados, sino como insumos para el diagnóstico de madurez tecnológica del sector y para la formulación de la propuesta estratégica orientada a la implementación gradual de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia.

3.6 Consideraciones éticas

El desarrollo de esta investigación se rige por principios éticos fundamentales que garantizan la integridad del proceso investigativo, la protección de los participantes y el uso responsable de la información recolectada. Estos principios son transversales a todas las fases del estudio y se aplican tanto a la recolección de datos mediante el cuestionario estructurado como al tratamiento de las fuentes documentales consultadas.

Todos los participantes serán informados de manera clara, completa y previa sobre el propósito de la investigación, los procedimientos de recolección de información, el uso que se dará a los datos suministrados y su derecho a retirarse voluntariamente del estudio en cualquier momento sin que ello implique consecuencia alguna. Antes de responder el cuestionario, cada participante deberá leer y aceptar explícitamente una declaración de consentimiento informado, la cual se presenta como instrumento formal en el **Anexo 2** de este documento. Dicha declaración especifica que la participación es voluntaria, que el propósito del estudio es estrictamente académico e investigativo, y que los datos proporcionados serán tratados con absoluta reserva.

La identidad de los participantes será protegida en todas las etapas del estudio. Los datos recolectados serán anonimizados antes de su análisis, de modo que ningún resultado publicado permita identificar individualmente a ningún encuestado. Los nombres, cargos específicos y entidades de pertenencia no serán divulgados en ningún informe, presentación o publicación derivada de esta investigación. Solo el equipo investigador tendrá acceso a la información original, la cual será almacenada en medios digitales seguros con acceso restringido mediante contraseña.

Los datos recopilados a través del cuestionario serán empleados exclusivamente para los fines establecidos en esta investigación, orientada al análisis del control de proyectos de infraestructura vial y la evaluación del potencial de herramientas tecnológicas como la IA, la ciencia de datos y la metodología BIM. La información no será compartida con terceros, ni utilizada con fines comerciales, institucionales o ajenos al propósito académico declarado, sin el consentimiento explícito de quienes la proporcionaron.

El estudio cumplirá con los principios establecidos en la Ley 1581 de 2012 (Congreso de la República de Colombia, 2012) sobre protección de datos personales, y su decreto reglamentario 1377 de 2013 (Presidencia de la República de Colombia, 2013), que regula el tratamiento de datos personales en Colombia. Asimismo, se observarán los lineamientos de la Ley 1712 de 2014 en lo relativo al acceso y uso de información pública proveniente de fuentes institucionales. En materia de principios éticos generales para investigación con seres humanos, se seguirán las directrices del Código de Ética del Project Management Institute (PMI, 2021) aplicables a investigaciones en gestión de proyectos.

La investigación se conducirá bajo estrictos criterios de honestidad intelectual y transparencia metodológica. Las fuentes bibliográficas serán citadas correctamente conforme a las normas APA 7.ª edición, evitando cualquier forma de plagio o uso indebido de información. Los resultados serán reportados fielmente, sin manipulación ni omisión selectiva de datos que pudiera distorsionar las conclusiones del estudio. Estas consideraciones buscan garantizar la validez ética y científica de la investigación, así como la confianza de los participantes y las instituciones involucradas (Sampieri et al., 2018).

4 HIPOTESIS

La incorporación de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la ciencia de datos y la metodología BIM en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia mejorará significativamente los mecanismos de supervisión, la gestión de costos y el cumplimiento de cronogramas. Específicamente, se espera que la adopción de estas tecnologías permita optimizar el uso de recursos financieros y técnicos, reducir las desviaciones presupuestales y mejorar la planificación y ejecución de las obras, minimizando retrasos y fortaleciendo la transparencia en los procesos de interventoría y control contractual.

4.1 Las variables

4.1.1 Variable independiente

La variable independiente en este estudio es el nivel de adopción de tecnologías emergentes en el control de proyectos de infraestructura vial, específicamente la inteligencia artificial (IA), la ciencia de datos y la metodología Building Information Modelling (BIM). Estas tecnologías representan la innovación aplicada al sector para optimizar los procesos de supervisión, trazabilidad y toma de decisiones en la gestión de obras viales en Colombia.

4.1.2 Variables dependientes

Las variables dependientes están directamente influenciadas por el nivel de adopción de las tecnologías emergentes mencionadas. Se propone que su implementación tendrá un impacto positivo en los siguientes aspectos clave del control de proyectos viales:

- Control de costos: se refiere a la capacidad de las entidades de interventoría y supervisión para identificar, prevenir y reducir las desviaciones presupuestales en los proyectos de infraestructura vial, mediante el uso de herramientas de análisis predictivo, modelos de datos y visualización BIM que permiten anticipar sobrecostos y optimizar el uso de recursos financieros y materiales.
- Control de tiempo: involucra la mejora en la planificación y seguimiento del cronograma de ejecución de las obras, minimizando retrasos mediante la detección temprana de

riesgos y la automatización de alertas, facilitada por algoritmos de inteligencia artificial y el procesamiento de datos en tiempo real.

- Eficiencia en los mecanismos de supervisión: hace referencia a la capacidad institucional para ejercer una interventoría más rigurosa, transparente y oportuna, apoyada en plataformas tecnológicas integradas que mejoren la trazabilidad de decisiones, el seguimiento técnico y la rendición de cuentas frente a las entidades de control.

5 RESULTADOS

5.1 Presentación de los resultados

5.1.1 Resultados de la revisión documental

5.1.1.1 Corpus documental — Matriz de revisión sistemática de literatura

La revisión sistemática de literatura se llevó a cabo en la base de datos Scopus, consultando artículos publicados entre 2016 y 2025. De un total de 259 documentos identificados inicialmente, se seleccionaron 30 referencias de mayor relevancia para los propósitos de esta investigación, organizadas en tres ejes temáticos: limitaciones en el control de proyectos viales en Colombia, inteligencia artificial y ciencia de datos, e implementación de la metodología BIM.

Tabla 1. Limitaciones en el control de construcción de infraestructura vial en Colombia

N°	Autor(es) y año	Tipo de documento	Metodología	Hallazgos relevantes para la investigación
1	Canales et al. (2023)	Artículo científico	Cuantitativa — encuesta a 42 ingenieros, pruebas Kruskal-Wallis, Dunn y Wilcoxon	La adquisición de tierras y permisos es la causa más severa de retrasos; las condiciones climáticas son las más frecuentes. Cada región requiere análisis específico.
2	León Gutiérrez (2021)	Monografía jurídica	Cualitativa — estudio de casos múltiples, análisis documental	El sector privado es instigador frecuente de corrupción en contratación pública. El 46 % de actos de corrupción ocurren en contratación pública en Colombia.
3	Serna et al. (2018)	Artículo científico	Cuantitativa — regresión multivariada	La planeación inadecuada del cronograma explica el 21 % de la varianza en retrasos. La falta de materiales a tiempo es el principal factor de sobrecosto (28 %).
4	Gordillo Chacón (s.f.)	Artículo de revisión	Revisión documental	Las interventorías carecen de recursos tecnológicos y sistemas de información integrados, lo que impide la supervisión en tiempo real.
5	Latorre Guerrero (2019)	Tesis de grado	Cualitativa — análisis jurídico	Identifica vacíos normativos en la figura de la interventoría que facilitan irregularidades contractuales en obras públicas.
6	Pérez (2017)	Artículo científico	Cuantitativa — análisis estadístico descriptivo	Las desviaciones de tiempo y costo son recurrentes en proyectos viales colombianos debido a deficiencias en la etapa de planeación.
7	Cardona Marín y Ortiz Galeano (2017)	Artículo académico	Revisión y análisis conceptual	La asignación de riesgos en proyectos viales debe apoyarse en herramientas analíticas y modelos de simulación para anticipar fallas técnicas y financieras.
8	Amaya Vergara (2022)	Documento de repositorio	Estudio de caso	La administración estratégica en proyectos viales colombianos evidencia debilidades en la integración de los actores y en los mecanismos de seguimiento.
9	Soto (2018)	Artículo científico	Cuantitativa — análisis de riesgos de cronograma	La gestión deficiente del cronograma y la falta de herramientas tecnológicas son las principales causas de retrasos en obras viales en América Latina.

10	Flores & Ascaño (2025)	Artículo científico	Cuantitativa — modelación de riesgos	El uso de algoritmos de aprendizaje automático permite reducir hasta un 25 % los sobrecostos y mejorar en un 30 % el cumplimiento de cronogramas en proyectos de construcción.

Tabla 2. Inteligencia artificial y ciencia de datos aplicadas a la construcción

N°	Autor(es) y año	Tipo de documento	Metodología	Hallazgos relevantes para la investigación
1	Egwim et al. (2023)	Revisión sistemática	PRISMA — 70 artículos revisados	La IA se aplica principalmente en gestión de instalaciones. El aprendizaje supervisado es la tecnología más utilizada. La falta de datos es el principal obstáculo.
2	Khan et al. (2024)	Artículo científico	Revisión integrativa	La integración de BIM e IA potencia la toma de decisiones en tiempo real y mejora la coordinación entre actores del proyecto.
3	Datta et al. (2024)	Artículo científico	Revisión sistemática	El machine learning aplicado a construcción permite predecir desviaciones de costo y tiempo con alta precisión en etapas tempranas de ejecución.
4	Adebayo et al. (2025)	Artículo científico	Revisión bibliométrica	La adopción de IA en construcción está creciendo aceleradamente pero con disparidades entre países desarrollados y en desarrollo.
5	Attia (2025)	Artículo científico	Revisión de literatura	La integración de IA en proyectos de construcción mejora la eficiencia operativa y reduce tiempos de respuesta ante desviaciones del plan.
6	Bang y Olsson (2022)	Artículo de conferencia	Revisión conceptual	La IA en proyectos de construcción tiene aplicaciones en detección de riesgos, control de calidad y optimización de recursos.
7	Bouabdallaoui et al. (2021b)	Ponencia de conferencia	Cuantitativa — modelos predictivos	Los modelos de predicción de productividad en construcción basados en IA superan en precisión a los métodos estadísticos tradicionales.
8	Dhenia (2022)	Artículo científico	Revisión aplicada	El análisis de datos en maquinaria de construcción permite anticipar fallas de equipo y optimizar el mantenimiento preventivo.
9	Khodabakhshian y Cecconi (2025b)	Ponencia académica	Revisión sistemática	La IA aplicada al control de proyectos de construcción mejora la detección

				temprana de desviaciones y fortalece la capacidad predictiva de los equipos.
10	Lo y Alshehhi (2025)	Artículo científico	Cuantitativa — machine learning	La implementación de aprendizaje automático en supervisión de obras permite automatizar el seguimiento de indicadores clave de desempeño.

Tabla 3. Implementación de la metodología BIM en proyectos de construcción

N°	Autor(es) y año	Tipo de documento	Metodología	Hallazgos relevantes para la investigación
1	Zabala-Vargas et al. (2023)	Revisión sistemática	PRISMA — 57 artículos	Big Data, ciencia de datos e IA se aplican principalmente en costo, calidad, tiempo y alcance. China, EE. UU. y Reino Unido lideran la investigación.
2	Fonseca et al. (2024)	Artículo científico	Revisión aplicada	BIM incrementa la productividad, optimiza recursos y contribuye a la toma de decisiones informadas en proyectos de infraestructura.
3	Diaz & Cogollo (2021)	Artículo académico	Investigación aplicada — caso colombiano	Propone una guía para la implementación de BIM en Colombia adaptada a las condiciones del sector constructor nacional.
4	Quintero et al. (2025)	Artículo científico	Cuantitativa — análisis de datos abiertos	El uso de datos abiertos en infraestructura colombiana permite identificar patrones de desviación de tiempo y costo, validando la aplicabilidad de modelos predictivos.
5	Castañeda et al. (2024)	Artículo científico	Revisión sistemática	La metodología BIM facilita la integración de información multidimensional y mejora la coordinación entre contratistas y supervisores en proyectos complejos.
6	Rey Ramos (2024)	Estudio de caso	Caso aplicado — infraestructura vial	BIM aplicado a obras de infraestructura vial permite reducir conflictos en diseño y mejorar la planificación constructiva.
7	Limas Mendigaño (2020)	Tesis de grado	Investigación aplicada	La aplicación de BIM en fases tempranas del proyecto vial reduce significativamente los errores de coordinación entre especialidades.
8	Solano et al. (2018)	Artículo académico	Revisión aplicada — contexto colombiano	Analiza la adopción de BIM en Colombia e identifica barreras institucionales, culturales y tecnológicas para su implementación.
9	Florez-Perez et al. (2022)	Ponencia de conferencia	Cuantitativa — modelos de productividad	La combinación de BIM con machine learning mejora la predicción de productividad y reduce la incertidumbre en la planificación de obras.

10	Gómez et al. (2023)	Artículo de revisión	Análisis bibliométrico por clústeres	Identifica líneas de investigación emergentes en construcción digital, destacando la convergencia entre BIM, IA y ciencia de datos como tendencia consolidada.

5.1.1.2 Análisis narrativo de la revisión sistemática de literatura

Eje 1. Limitaciones en el control de construcción de infraestructura vial en Colombia

La literatura revisada en este eje confirma de manera consistente que los proyectos de infraestructura vial en Colombia enfrentan deficiencias estructurales en sus mecanismos de control y supervisión, cuyas causas son multidimensionales y se refuerzan mutuamente.

Desde la perspectiva de las causas de retrasos y sobrecostos, Canales et al. (2023) identificaron que la adquisición de tierras y permisos constituye la causa más severa de retrasos en la región Caribe colombiana, mientras que las condiciones climáticas son las más frecuentes. Este estudio subraya que la frecuencia y la severidad de las causas no siempre coinciden, lo que implica que los mecanismos de control deben ser capaces de diferenciar entre eventos recurrentes y eventos de alto impacto. En una línea complementaria, Serna (2018) encontró que la planeación inadecuada del cronograma explica el 21 % de la varianza en los retrasos, mientras que la falta de materiales a tiempo es el principal factor de sobrecosto, con un peso explicativo del 28 %. Estos hallazgos son coherentes con los de Pérez (2017), quien señala que las desviaciones de tiempo y costo son recurrentes en proyectos viales colombianos debido fundamentalmente a debilidades en la etapa de planeación, y con los de Soto (2018), quien a nivel latinoamericano identificó la gestión deficiente del cronograma y la ausencia de herramientas tecnológicas como las principales causas de retraso en obras viales.

En cuanto a las capacidades institucionales de control, Gordillo Chacón (s.f.) evidenció que las interventorías colombianas carecen de recursos tecnológicos suficientes y de sistemas de información integrados, lo que impide la supervisión en tiempo real y genera déficits en la gestión técnica de las obras. Esta limitación estructural es agravada por los vacíos normativos identificados por Latorre Guerrero (2019) en la figura jurídica de la interventoría, los cuales facilitan irregularidades contractuales que comprometen la transparencia y la eficacia del control. La UMNG (s.f.), por su parte, documentó debilidades en la integración de los actores del proyecto y en los mecanismos de seguimiento como factores determinantes en el desempeño deficiente de proyectos viales estratégicos.

La dimensión ética y de integridad institucional también emerge como un factor crítico en la literatura revisada. León Gutiérrez (2021) demostró, a través del análisis de casos emblemáticos como la Ruta del Sol II y el Carrusel de la Contratación de Bogotá, que el sector privado actúa frecuentemente como instigador de prácticas corruptas en la contratación pública, a través de mecanismos como la elaboración de pliegos a medida y el financiamiento de campañas políticas. Este hallazgo es especialmente relevante para esta investigación porque evidencia que las debilidades en el control no son únicamente de carácter técnico, sino también institucional y ético, lo que refuerza la necesidad de herramientas que fortalezcan la trazabilidad y la transparencia en la ejecución contractual.

Finalmente, Marín (s.f.) argumenta que la gestión de riesgos en infraestructura vial debe apoyarse en herramientas analíticas y modelos de simulación capaces de anticipar fallas antes de que se conviertan en problemas financieros o técnicos, mientras que Flores y Ascaño (2025) demuestran empíricamente que el uso de algoritmos de aprendizaje automático puede reducir

hasta un 25 % los sobrecostos y mejorar en un 30 % el cumplimiento de cronogramas en proyectos de construcción. En conjunto, la literatura de este eje establece un diagnóstico claro: los mecanismos tradicionales de control son insuficientes y deben ser fortalecidos con herramientas tecnológicas que permitan pasar de un enfoque reactivo a uno predictivo y preventivo.

Eje 2. Inteligencia artificial y ciencia de datos aplicadas a la construcción

La revisión de literatura en este eje revela un crecimiento acelerado en la investigación sobre aplicaciones de inteligencia artificial y ciencia de datos en el sector de la construcción, con hallazgos que respaldan de manera consistente su potencial para transformar los procesos de control y supervisión de proyectos.

Egwim (2023), en una revisión sistemática de 70 artículos bajo el protocolo PRISMA, identificó que las tecnologías de IA se utilizan principalmente en la fase de gestión de instalaciones, con el aprendizaje supervisado como la tecnología más frecuentemente aplicada, seguida por el aprendizaje profundo y los sistemas basados en conocimiento. El autor señala que el principal obstáculo para la implementación de la IA en el sector es la baja precisión de los modelos derivada de la insuficiencia de datos relevantes, lo que subraya la importancia de fortalecer simultáneamente los sistemas de registro y digitalización de información, tal como se propone en esta investigación. En una dirección similar, Zabala-Vargas et al. (2023), en una revisión de 57 artículos, encontraron que el Big Data, la ciencia de datos y la IA se aplican principalmente en las áreas de costo, calidad, tiempo y alcance de los proyectos, que son

precisamente las dimensiones donde se concentran las mayores deficiencias en el control de proyectos viales colombianos.

La capacidad predictiva de estas tecnologías ha sido documentada con evidencia empírica en múltiples estudios. Datta et al. (2024) demostraron que los modelos de machine learning permiten predecir desviaciones de costo y tiempo con alta precisión en etapas tempranas de ejecución, lo que representa una ventaja significativa frente a los métodos de control tradicionales que detectan las desviaciones cuando ya han ocurrido. El grupo de investigación de ISARC (2022) corroboró que los modelos predictivos basados en IA superan en precisión a los métodos estadísticos tradicionales para estimar la productividad en obras de construcción, mientras que ScienceDirect (2025) reporta que la implementación de aprendizaje automático en la supervisión de obras permite automatizar el seguimiento de indicadores clave de desempeño, reduciendo la carga operativa de los equipos de control.

En cuanto a las tendencias globales de adopción, Adebayo et al. (2025) identificaron mediante análisis bibliométrico que la adopción de IA en construcción está creciendo aceleradamente, pero con disparidades importantes entre países desarrollados y en desarrollo, lo que es coherente con los bajos niveles de adopción tecnológica encontrados en los resultados de la encuesta de esta investigación. Springer (2025) complementa este panorama al señalar que la integración de IA en proyectos de construcción mejora la eficiencia operativa y reduce los tiempos de respuesta ante desviaciones del plan, mientras que el grupo de investigación de Purdue y CIB (2025) confirma que su aplicación específica al control de proyectos fortalece la detección temprana de desviaciones y la capacidad predictiva de los equipos de supervisión.

Finalmente, Dhenia (2022) reporta una aplicación particularmente relevante para el contexto vial: el análisis de datos en maquinaria de construcción permite anticipar fallas de equipo y optimizar el mantenimiento preventivo, lo que reduce interrupciones no planificadas que frecuentemente derivan en retrasos y sobrecostos. En conjunto, la literatura de este eje demuestra que la IA y la ciencia de datos no son tecnologías experimentales en el sector de la construcción, sino herramientas con evidencia empírica sólida cuya adopción en Colombia está significativamente rezagada respecto al estado del arte internacional.

Eje 3. Implementación de la metodología BIM en proyectos de construcción

La revisión de literatura en este eje documenta tanto el potencial transformador de la metodología BIM para el control de proyectos de infraestructura como las barreras específicas que enfrenta su implementación en el contexto colombiano, ofreciendo un marco de referencia fundamental para la propuesta estratégica de esta investigación.

Castañeda et al. (2024) definen BIM como una metodología que permite la integración de información multidimensional a lo largo del ciclo de vida del proyecto, facilitando la coordinación entre contratistas, supervisores y entidades contratantes. Esta capacidad de integración es precisamente la que resulta más valiosa en el contexto del control de proyectos viales colombianos, donde la fragmentación de la información entre actores ha sido identificada como una de las principales causas de ineficiencia. Jezreel Fonseca et al. (2024) complementan este hallazgo al demostrar que BIM incrementa la productividad, optimiza el uso de recursos y contribuye a la toma de decisiones informadas en proyectos de infraestructura, mientras que Rey Ramos (2024) documenta mediante un estudio de caso que su aplicación en obras de

infraestructura vial permite reducir conflictos en la fase de diseño y mejorar significativamente la planificación constructiva.

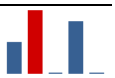
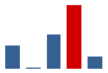
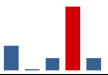
Desde la perspectiva de la convergencia tecnológica, Khan et al. (2024) demostraron que la integración de BIM e IA potencia la toma de decisiones en tiempo real y mejora sustancialmente la coordinación entre los actores del proyecto, mientras que el grupo de investigación de ISARC (2022) encontró que la combinación de BIM con machine learning mejora la predicción de productividad y reduce la incertidumbre en la planificación de obras. Esta convergencia es coherente con las tendencias identificadas por el análisis bibliométrico de Construction 4.0 (s.f.), que señala la integración entre BIM, IA y ciencia de datos como una de las líneas de investigación más consolidadas y con mayor proyección en la construcción digital a nivel global.

En el contexto colombiano, los hallazgos son especialmente relevantes para fundamentar la propuesta de esta investigación. Diaz y Cogollo (2021) propusieron una guía para la implementación de BIM en Colombia adaptada a las condiciones específicas del sector constructor nacional, reconociendo que los modelos de adopción internacional no pueden trasladarse directamente sin considerar las particularidades institucionales, técnicas y culturales del país. En una línea similar, López Solano et al. (s.f.) identificaron barreras institucionales, culturales y tecnológicas para la implementación de BIM en Colombia, incluyendo la resistencia al cambio, la falta de capacitación y la ausencia de políticas públicas que incentiven su adopción. Limas Mendigaño (2020) añade que la aplicación de BIM en fases tempranas del proyecto vial reduce significativamente los errores de coordinación entre especialidades, lo que refuerza la necesidad de adoptarlo desde las etapas de planeación y no solo en la ejecución.

Finalmente, Quintero et al. (2025) aportaron evidencia empírica desde Colombia al demostrar que el uso de datos abiertos en proyectos de infraestructura permite identificar patrones de desviación de tiempo y costo, validando la aplicabilidad de modelos predictivos basados en datos en el sector vial colombiano. Este hallazgo es especialmente significativo porque conecta la metodología BIM con la ciencia de datos en un contexto nacional, confirmando que las condiciones para avanzar hacia un ecosistema tecnológico integrado existen, aunque requieren de una estrategia deliberada y estructurada para materializarse. En conjunto, la literatura de este eje establece que BIM es una herramienta madura y con evidencia sólida de efectividad, cuya adopción en Colombia requiere superar barreras específicas que la propuesta estratégica de esta investigación busca precisamente abordar.

5.1.2 Resultados de la encuesta

Tabla 4 Modelo de negocio y producto - Nivel estratégico

Modelo de negocio y producto						
Preguntas	***Nulo***	***Existe la iniciativa***	***En desarrollo***	***En implementación***	***En acción***	***Columnas***
Cuenta con una estrategia de transformación digital formulada desde la alta dirección.	20.50 %	28.80 %	12.30 %	26.00 %	12.30 %	
Cuenta con indicadores para medir el nivel de transformación digital.	45.20 %	17.80 %	15.10 %	15.10 %	6.80 %	
Tiene interés en la capacitación del talento humano en transformación	11.00 %	37.00 %	11.00 %	23.30 %	17.80 %	
Algunos de sus productos integran tecnologías emergentes (inteligencia artificial, big data o ciencia de	39.70 %	13.70 %	9.60 %	26.00 %	11.00 %	
Reconoce la importancia que tiene el uso y análisis de la información.	5.50 %	23.30 %	12.30 %	26.00 %	32.90 %	
Identifica que el desarrollo y la innovación tecnológica juegan un	5.50 %	15.10 %	19.20 %	23.30 %	37.00 %	
Cuenta con claridad en los procesos y protocolos para llevar a cabo proyectos con alta incorporación	19.20 %	13.70 %	21.90 %	28.80 %	16.40 %	
Reconoce los conceptos de tecnologías emergentes (inteligencia artificial, big data y data science).	20.50 %	12.30 %	16.40 %	34.20 %	16.40 %	

Los resultados de esta tabla revelan un panorama general de madurez tecnológica incipiente en el sector, con brechas significativas entre el reconocimiento de la importancia de las tecnologías emergentes y su implementación efectiva en los procesos organizacionales.

En cuanto a la estrategia de transformación digital, el 49.30 % de los encuestados reporta que en su organización dicha estrategia es nula o apenas existe como iniciativa, mientras que solo el 12.30 % indica que ya se encuentra en acción. Esto sugiere que a pesar de que la transformación digital es reconocida como una necesidad, la mayoría de las organizaciones aún no ha formalizado su adopción desde la alta dirección.

La situación se agudiza en el indicador de medición del nivel de transformación digital, donde el 45.20 % de los participantes señala que no existe ningún mecanismo de medición, siendo este el porcentaje de respuesta nula más alto de toda la tabla. Este hallazgo crítico, ya que sin indicadores de seguimiento es imposible evaluar el avance real hacia la digitalización de los procesos de control.

Por otro lado, se identifican señales positivas en cuanto a la percepción del valor de las tecnologías. El 59.90 % de los encuestados reconoce la importancia del uso y análisis de la información (en implementación y en acción combinados), y el 60.20 % considera que el desarrollo y la innovación tecnológica juegan un papel importante en su sector. Estos dos ítems concentran los porcentajes más altos en las categorías de mayor madurez, lo que indica una disposición favorable por parte de las empresas hacia la transformación digital, aunque todavía no se traduce en acciones concretas.

En lo referente a la integración de tecnologías emergentes como inteligencia artificial, ciencia de datos o Big Data en los productos y servicios, el 39.70 % reporta que esta integración es nula, siendo uno de los indicadores de atraso más preocupantes. Esto es coherente con lo documentado en el planteamiento del problema, donde se evidencia que el sector de la infraestructura vial en Colombia presenta una adopción tecnológica limitada y fragmentada.

Finalmente, el ítem relacionado con la claridad en procesos y protocolos para proyectos de alta incorporación tecnológica muestra una distribución relativamente equilibrada entre los niveles, con un 28.80 % en implementación y un 16.40 % en acción, lo que sugiere que algunas organizaciones han avanzado en la definición de marcos operativos, aunque sin consolidarlos plenamente.

En síntesis, los datos de esta tabla evidencian que el sector se encuentra en una etapa de transición, donde predomina el reconocimiento teórico de la importancia de las tecnologías emergentes, pero persisten importantes déficits en su implementación práctica, medición y articulación estratégica, lo que refuerza la pertinencia de la propuesta de esta investigación.

Tabla 5 Áreas de inversión tecnológica en los últimos dos años

¿En qué area de su empresa se ha invertido en los dos últimos años?					
Preguntas	***Nula inversión***	***Pequeña inversión***	***Mediana inversión***	***Gran inversión***	***Columnas***
Investigación y desarrollo	21.90 %	45.20 %	27.40 %	5.50 %	
Producción de productos o servicios	11.00 %	28.80 %	34.20 %	26.00 %	
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano)	12.30 %	37.00 %	34.20 %	16.40 %	
Logística de recepción y distribución	24.70 %	37.00 %	32.90 %	5.50 %	
Comercial y ventas	23.30 %	35.60 %	28.80 %	12.30 %	
Sistemas de información (Herramientas software)	15.10 %	39.70 %	27.40 %	17.80 %	

Los resultados de esta tabla permiten identificar en qué áreas las organizaciones del sector han concentrado sus recursos de inversión tecnológica durante los dos últimos años, revelando patrones que son coherentes con el bajo nivel de madurez digital evidenciado en la tabla anterior.

El área de producción de productos o servicios es la que registra el mayor nivel de inversión, con un 26.00 % en gran inversión y un 34.20 % en mediana inversión, acumulando el 60.20 % de los encuestados en los dos niveles más altos. Esto indica que las organizaciones priorizan la inversión tecnológica en los procesos directamente relacionados con su operación central, lo cual es comprensible pero insuficiente si no va acompañado de inversión en control y supervisión.

Los procesos administrativos internos como contabilidad y talento humano también muestran un nivel de inversión moderadamente alto, con un 50.60 % entre mediana y gran inversión. Este resultado sugiere que la digitalización administrativa ha tenido mayor penetración que la digitalización operativa en campo, lo que genera una brecha entre la gestión interna y la supervisión técnica de los proyectos.

En contraste, el área de investigación y desarrollo presenta el panorama más crítico: el 67.10 % de los encuestados reporta nula o pequeña inversión en este rubro, con apenas un 5.50% que declara gran inversión. Este hallazgo es especialmente relevante para los propósitos de esta investigación, ya que la innovación tecnológica aplicada al control de proyectos viales requiere precisamente de inversión sostenida en investigación y desarrollo como condición habilitadora.

Los sistemas de información y herramientas de software, que constituyen la base tecnológica necesaria para implementar soluciones de IA, ciencia de datos y BIM, muestran una distribución preocupante: el 54.80 % de los encuestados reporta nula o pequeña inversión en este rubro, y solo el 17.80 % declara gran inversión. Considerando que estas herramientas son el vehículo principal para la transformación digital del control de proyectos, este nivel de inversión resulta insuficiente para sostener una adopción tecnológica efectiva.

La logística de recepción y distribución y el área comercial y de ventas presentan comportamientos similares entre sí, con predominio de pequeña inversión (37.00 % y 35.60 % respectivamente) y niveles bajos de gran inversión, lo que indica que estas áreas no han sido priorizadas en los planes de modernización tecnológica de las organizaciones encuestadas.

En conjunto, los resultados de esta tabla evidencian una inversión tecnológica concentrada en los procesos operativos y administrativos más inmediatos, mientras que áreas estratégicas como la investigación, el desarrollo y los sistemas de información reciben recursos insuficientes. Esta distribución de la inversión es consistente con la hipótesis de esta investigación, que plantea que la baja adopción de tecnologías emergentes en el control de proyectos de infraestructura vial no es solo un problema de disponibilidad tecnológica, sino también de priorización estratégica de los recursos.

Tabla 6 Áreas de inversión tecnológica proyectada para los próximos cinco años

¿En qué area de lu empresa planea invertir en los próximos cinco años?					
Preguntas	**Nula inversión**	**Pequeña inversión**	**Mediana inversión**	**Gran inversión**	**Columnas**
Investigación y desarrollo	13.70 %	35.60 %	32.90 %	17.80 %	
Producción de productos o servicios	9.60 %	15.10 %	37.00 %	38.40 %	
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano)	12.30 %	28.80 %	30.10 %	28.80 %	
Logística de recepción y distribución	17.80 %	31.50 %	28.80 %	21.90 %	
Comercial y ventas	16.40 %	20.50 %	34.20 %	28.80 %	
Sistemas de información (Herramientas software)	11.00 %	20.50 %	38.40 %	30.10 %	

Esta tabla complementa directamente los hallazgos de la tabla anterior y permite identificar las tendencias de inversión futura que las organizaciones del sector tienen proyectadas, lo cual resulta especialmente valioso para evaluar el potencial de adopción tecnológica a mediano plazo.

El dato más destacado es el cambio de tendencia en investigación y desarrollo: mientras que en los últimos dos años el 67.10 % reportaba nula o pequeña inversión en este rubro, para los próximos cinco años ese porcentaje se reduce al 49.30 %, y la gran inversión pasa del 5.50 % al 17.80 %. Aunque la mejora es moderada, representa una señal positiva de que las organizaciones comienzan a reconocer la necesidad de fortalecer su capacidad innovadora, lo cual es coherente con el creciente interés en tecnologías emergentes evidenciado en la Tabla 1.

El área de producción de productos o servicios mantiene su posición como la de mayor inversión proyectada, con un 38.40 % en gran inversión y un 37.00 % en mediana inversión, acumulando el 75.40 % en los niveles más altos. Este resultado confirma que la operación directa seguirá siendo la prioridad de inversión tecnológica en el sector, lo que puede representar una oportunidad si dicha inversión se orienta hacia herramientas de control y seguimiento en campo.

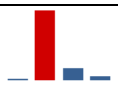
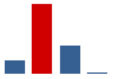
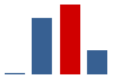
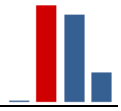
Los sistemas de información y herramientas de software muestran el cambio más significativo y relevante para esta investigación: la gran inversión proyectada pasa del 17.80 % actual al 30.10 %, y la mediana inversión sube al 38.40 %, acumulando un 68.50 % entre ambos niveles. Este incremento proyectado es particularmente importante porque los sistemas de información constituyen la infraestructura tecnológica base sobre la cual se pueden implementar soluciones de IA, ciencia de datos y BIM en el control de proyectos viales.

Los procesos administrativos internos mantienen niveles similares de inversión proyectada respecto a los actuales, con un 58.90 % entre mediana y gran inversión, lo que sugiere que la digitalización administrativa continuará siendo una prioridad estable pero sin crecimiento acelerado.

Las áreas de logística y comercial y ventas presentan distribuciones más conservadoras, con predominio de pequeña y mediana inversión, y porcentajes de nula inversión que se mantienen entre el 16 % y el 18 %, lo que indica que estas áreas no serán foco prioritario de modernización tecnológica en el horizonte proyectado.

En términos comparativos entre las Tablas 2 y 3, se observa una tendencia general hacia el incremento de la inversión en casi todas las áreas, lo que refleja una mayor conciencia organizacional sobre la necesidad de la transformación digital. Sin embargo, la brecha entre la inversión actual y la proyectada sigue siendo modesta en áreas críticas como investigación y desarrollo y sistemas de información, lo que indica que el ritmo de adopción tecnológica podría ser insuficiente frente a los desafíos que enfrenta el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia. Este panorama refuerza la urgencia de las estrategias propuestas en esta investigación, orientadas a acelerar y estructurar dicho proceso de transformación.

Tabla 7 Clientes y proveedores – Nivel de implementación de sistemas de información e integración

	Clientes y proveedores				
Preguntas	***No se realiza***	***En algunos casos***	***En la mayoría de casos***	***Se realiza permanentemente***	***Columnas***
Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de proveedores.	15.30 %	47.20 %	20.80 %	16.70 %	
Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de clientes.	18.10 %	44.40 %	25.00 %	12.50 %	
Analiza información de sus clientes para generar o mejorar productos o servicios.	9.90 %	32.40 %	38.00 %	19.70 %	
Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus clientes.	4.20 %	32.40 %	35.20 %	28.20 %	
Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus proveedores.	8.30 %	37.50 %	40.30 %	13.90 %	
Cuenta con la planificación y dirección de la cadena de suministros desde los clientes hasta los proveedores.	9.70 %	37.50 %	34.70 %	18.10 %	

Esta tabla examina el grado en que las organizaciones del sector han integrado sistemas de información y canales de comunicación en su relacionamiento con clientes y proveedores, una dimensión clave para evaluar la madurez digital en la gestión de la cadena de valor de los proyectos.

El hallazgo más destacado es que en todos los ítems evaluados predomina la categoría "en algunos casos", lo que indica una implementación parcial, discontinua y no sistemática de las herramientas digitales en la gestión de las relaciones externas. Esta fragmentación es consistente con el patrón general identificado en las tablas anteriores, donde el reconocimiento de la importancia tecnológica no se traduce en una adopción estructurada y permanente.

En cuanto a la implementación de sistemas de información para la gestión de proveedores, el 62.50 % de los encuestados reporta que esta práctica no se realiza o solo ocurre

en algunos casos, mientras que apenas el 16.70 % la realiza de forma permanente. La situación es similar para la gestión de clientes, donde el 62.50 % se ubica en los mismos dos niveles más bajos y solo el 12.50 % la implementa permanentemente. Estos resultados son especialmente relevantes en el contexto de proyectos de infraestructura vial, donde la coordinación efectiva entre contratistas, interventores y entidades contratantes es determinante para el éxito del control contractual.

El ítem de análisis de información de clientes para mejorar productos o servicios muestra un comportamiento más favorable, con el 57.70 % ubicado entre "en la mayoría de casos" y "se realiza permanentemente". Esto sugiere que las organizaciones han avanzado más en el uso de datos para la mejora de su oferta que en la automatización de sus procesos de gestión de relaciones, lo que evidencia una digitalización selectiva y no integral.

La integración de múltiples canales de comunicación con clientes es el ítem con mejor desempeño de toda la tabla, con un 63.40 % entre "en la mayoría de casos" y "se realiza permanentemente", y el porcentaje más bajo de "no se realiza" (4.20 %). Este resultado indica que la comunicación multicanal con clientes es la práctica digital más extendida en el sector, posiblemente impulsada por la adopción generalizada de herramientas de mensajería y colaboración digital.

Sin embargo, la integración de canales de comunicación con proveedores presenta un desempeño más modesto, con solo el 13.90 % en implementación permanente y un 37.50 % que lo hace solo en algunos casos. Esta asimetría entre la comunicación con clientes y proveedores refleja una brecha en la digitalización de la cadena de suministro, que en proyectos viales incluye actores críticos como proveedores de materiales, equipos y servicios especializados.

Finalmente, la planificación y dirección de la cadena de suministros muestra que el 47.20% de los encuestados la gestiona de forma parcial o no la realiza, con apenas un 18.10% que lo hace permanentemente. En el contexto de proyectos de infraestructura vial, donde la gestión eficiente de la cadena de suministro es determinante para el cumplimiento de cronogramas y presupuestos, este resultado confirma una de las vulnerabilidades estructurales más importantes del sector.

En conjunto, los datos de esta tabla revelan que la digitalización de las relaciones con clientes y proveedores se encuentra en una etapa incipiente, con avances puntuales en comunicación pero con déficits importantes en la integración sistemática de sistemas de información. Esta situación limita la capacidad de las organizaciones para ejercer un control efectivo sobre su cadena de valor, lo que repercute directamente en la eficiencia y transparencia de la ejecución de los proyectos viales.

Tabla 8 Nivel de digitalización en la gestión de clientes, proveedores e información comercial

Preguntas	*Muy bajo*	*Bajo*	*Medio*	*Alto*	*Muy alto*	*Columnas*
Digitalización de trabajo con clientes	12.50 %	9.70 %	37.50 %	31.90 %	8.30 %	
Digitalización de trabajo con proveedores	9.70 %	19.40 %	30.60 %	36.10 %	4.20 %	
Intercambio de información digitalmente con socios, proveedores y clientes	11.10 %	15.30 %	36.10 %	34.70 %	2.80 %	
Uso de multiples canales de venta integrados para comercializar sus productos a sus clientes	9.90 %	21.10 %	31.00 %	32.40 %	5.60 %	
Sistema de precios dinamico y adaptado al cliente	12.70 %	11.30 %	39.40 %	31.00 %	5.60 %	
Analiza los datos de los clientes para aumentar su conocimiento (Situación personal, preferencias, ubicación, puntuación crediticia)	11.10 %	11.10 %	36.10 %	30.60 %	11.10 %	
Diseña soluciones considerando los datos de los clientes	4.20 %	13.90 %	36.10 %	29.20 %	16.70 %	

Esta tabla evalúa el nivel de digitalización en dimensiones específicas de la gestión comercial y relacional de las organizaciones, utilizando una escala de cinco niveles que va desde muy bajo hasta muy alto. Los resultados complementan los hallazgos de la tabla anterior y permiten profundizar en la caracterización del estado actual de la transformación digital en el sector.

Un patrón transversal a todos los ítems es la concentración de respuestas en el nivel medio, que en la mayoría de los casos supera el 30 %, seguido por el nivel alto. Esto confirma que el sector se encuentra en una etapa de transición digital, donde las organizaciones han superado los niveles más básicos pero aún no logran consolidar prácticas digitales de alto impacto de manera sistemática.

La digitalización del trabajo con clientes muestra que el 40.20 % se ubica entre alto y muy alto, siendo uno de los ítems con mejor desempeño de la tabla. Esto es coherente con lo observado en la tabla anterior, donde la comunicación con clientes era la práctica digital más extendida. Sin embargo, el 22.20 % aún reporta niveles muy bajo o bajo, lo que indica que una porción relevante del sector permanece rezagada incluso en esta dimensión.

La digitalización del trabajo con proveedores presenta un comportamiento similar, con el 40.30 % entre alto y muy alto, aunque con un porcentaje mayor en nivel bajo (19.40 %) respecto a la digitalización con clientes. Esta diferencia ratifica la asimetría ya identificada entre la gestión digital de clientes y proveedores, siendo esta última más débil en el sector.

El intercambio de información digitalmente con socios, proveedores y clientes registra apenas el 37.50 % entre alto y muy alto, con un nivel muy alto de solo el 2.80 %, el más bajo de

toda la tabla. Este resultado es particularmente preocupante en el contexto de proyectos de infraestructura vial, donde la interoperabilidad digital entre los distintos actores del proyecto, contratistas, interventores, proveedores y entidades públicas, es una condición indispensable para implementar soluciones integradas de control basadas en IA y BIM.

El ítem de uso de múltiples canales de venta integrados muestra que el 37.00 % se ubica entre los niveles medio y alto, pero con un porcentaje relevante en nivel bajo (21.10 %), lo que sugiere que la integración de canales comerciales digitales todavía no es una práctica consolidada en el sector.

El sistema de precios dinámico y adaptado al cliente concentra el mayor porcentaje en nivel medio (39.40 %), con apenas el 5.60 % en muy alto. En el contexto de proyectos viales, este ítem puede interpretarse como la capacidad de ajustar estimaciones de costos en tiempo real, una funcionalidad directamente relacionada con el control presupuestal que esta investigación busca fortalecer.

El ítem de análisis de datos de clientes para aumentar su conocimiento muestra un desempeño relativamente positivo, con el 41.70 % entre alto y muy alto, lo que indica que el uso de datos para la toma de decisiones comerciales tiene mayor penetración que su uso en procesos operativos y de control.

Finalmente, el ítem de diseño de soluciones considerando los datos de los clientes presenta la distribución más favorable en el nivel muy alto (16.70 %), el más alto de toda la tabla, aunque el 18.10 % aún reporta niveles muy bajo o bajo. Este resultado sugiere que existe un núcleo de organizaciones más avanzadas que ya incorporan datos en el diseño de sus

soluciones, lo que podría representar un punto de partida para la difusión de prácticas de gestión basada en datos en el resto del sector.

En síntesis, los resultados de esta tabla confirman que el sector se encuentra en un nivel medio de digitalización relacional y comercial, con avances desiguales entre las distintas dimensiones evaluadas. La baja puntuación en el intercambio digital de información entre actores y en la integración de sistemas multicanal representa uno de los obstáculos más importantes para la implementación efectiva de tecnologías de control colaborativo como BIM y la IA en proyectos de infraestructura vial.

Tabla 9 Tecnologías utilizadas actualmente en las organizaciones

¿Cual de las siguientes tecnologías utiliza en su organización?	
Dispositivos moviles	28%
Las tecnologias de la nube como infraestructura de TI escalable	15%
Sistemas de localizacion en tiempo real	13%
Sistemas de tecnologias de la informacion integrados	10%
Ciencia de datos para evaluacion de informacion en tiempo real.	9%
Sensores	9%
Big Data para almacenamiento de grandes volumenes de datos	8%
Inteligencia artificial para la toma de decisiones.	4%
Identificador de radiofrecuencia - RFID	2%
DRONE	1%
BIM	1%
No aplica	1%
Ninguna	1%

Esta tabla ofrece una radiografía directa del estado de adopción tecnológica en las organizaciones encuestadas, y constituye uno de los hallazgos más reveladores de toda la investigación en relación con los objetivos planteados.

El resultado más llamativo es el predominio de los dispositivos móviles como la tecnología más utilizada, con un 28 % de las respuestas. Si bien su uso es generalizado en casi

todos los sectores económicos, su presencia como tecnología dominante en el sector refleja que la digitalización en curso es fundamentalmente de carácter básico y orientada a la comunicación, más que a la gestión avanzada de datos o al control inteligente de procesos.

Las tecnologías de nube como infraestructura de TI escalable ocupan el segundo lugar con un 15 %, seguidas por los sistemas de localización en tiempo real con un 13 %. Aunque estos dos elementos representan avances hacia una infraestructura digital más robusta, su nivel de adopción sigue siendo minoritario dentro del sector, lo que limita la capacidad de escalar hacia soluciones más complejas de gestión y control.

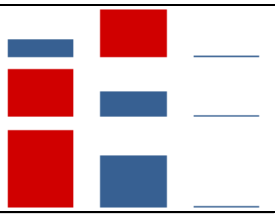
Los sistemas de tecnologías de la información integrados alcanzan apenas el 10 %, lo que es coherente con los bajos niveles de inversión en sistemas de información identificados en las tablas anteriores. Este dato confirma que la integración de plataformas tecnológicas, condición indispensable para implementar soluciones de control en tiempo real, sigue siendo una asignatura pendiente en la mayoría de las organizaciones.

Los datos más críticos para los propósitos de esta investigación son los correspondientes a las tecnologías emergentes objeto de estudio. La ciencia de datos y los sensores registran apenas un 9 % cada uno, el Big Data un 8 %, y la inteligencia artificial para la toma de decisiones un preocupante 4 %. Más significativo aún es el caso de BIM, que junto con drones, RFID, la opción "no aplica" y "ninguna", registra únicamente un 1 % cada uno. Este resultado es contundente: la metodología BIM, que en el planteamiento del problema y el marco teórico se identifica como una de las herramientas con mayor potencial para transformar el control de proyectos viales, tiene una penetración prácticamente nula en las organizaciones encuestadas.

La distribución general de esta tabla dibuja un sector donde la adopción tecnológica está concentrada en herramientas de uso cotidiano y comunicación básica, mientras que las tecnologías con mayor capacidad transformadora para el control de proyectos, IA, ciencia de datos, BIM y Big Data, permanecen en los últimos lugares de adopción. Este hallazgo valida de manera empírica la hipótesis central de esta investigación y refuerza la urgencia de las estrategias propuestas para cerrar esta brecha tecnológica en el sector de la infraestructura vial colombiana.

Adicionalmente, el hecho de que solo el 1 % de los encuestados haya respondido "ninguna" indica que prácticamente todas las organizaciones utilizan algún tipo de tecnología, lo que sugiere que existe una base mínima de infraestructura digital sobre la cual se pueden construir estrategias de adopción tecnológica más avanzadas y estructuradas.

Tabla 10 Grado de implementación de funcionalidades de conectividad e interoperabilidad

¿Cuál es el grado de implementación de las siguientes funcionalidades?				
Preguntas	***Nulo***	***Parcialmente***	***Implementado***	***Columnas***
Las máquinas y sistemas se pueden controlar a través de tecnologías	30.10 %	54.80 %	15.10 %	
Comunicación entre máquinas / Sistemas - M2M	60.30 %	34.20 %	5.50 %	
Capacidad de integrarse y colaborar con otras maquinas / Sistemas - Interoperabilidad	53.40 %	38.40 %	8.20 %	

Esta tabla evalúa tres funcionalidades tecnológicas avanzadas que son fundamentales para la digitalización de los procesos de control en proyectos de infraestructura: el control remoto de máquinas y sistemas, la comunicación máquina a máquina (M2M) y la interoperabilidad entre sistemas. Los resultados son especialmente relevantes porque estas capacidades constituyen la base tecnológica sobre la cual se construyen soluciones de monitoreo en tiempo real, gestión predictiva y control inteligente de obras.

El hallazgo más contundente de esta tabla es que en los tres ítems evaluados predomina ampliamente la implementación nula o parcial, con porcentajes de implementación completa que no superan el 15.10 % en ningún caso, lo que confirma que el sector se encuentra en una etapa muy temprana de adopción de estas capacidades tecnológicas avanzadas.

El ítem con mejor desempeño es el control de máquinas y sistemas a través de tecnologías, donde el 15.10 % reporta implementación completa y el 54.80 % una implementación parcial. Aunque este último porcentaje podría interpretarse como un avance, la naturaleza parcial de la implementación indica que su uso no es sistemático ni está integrado en los procesos de control y supervisión de manera estructurada. En el contexto de proyectos viales, esta funcionalidad es clave para el monitoreo remoto de equipos de construcción, el seguimiento de maquinaria pesada y la verificación del avance físico de las obras.

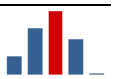
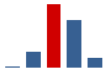
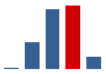
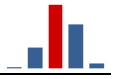
La comunicación entre máquinas y sistemas (M2M) presenta el panorama más crítico de la tabla, con un 60.30 % de implementación nula y apenas un 5.50 % de implementación completa. Esta tecnología, que permite la transmisión automática de datos entre dispositivos sin intervención humana, es un componente esencial para los sistemas de monitoreo en tiempo real y para la alimentación automática de plataformas de gestión de proyectos. Su práctica ausencia en el sector representa una limitación estructural importante para avanzar hacia modelos de control basados en datos continuos y actualizados.

La capacidad de interoperabilidad entre máquinas y sistemas muestra resultados igualmente preocupantes, con un 53.40 % de implementación nula y solo un 8.20 % de implementación completa. La interoperabilidad es precisamente la condición habilitadora para la integración de la metodología BIM con sistemas de IA y ciencia de datos, ya que permite que

distintas plataformas y herramiennas tecnológicas compartan información de manera fluida y consistente. La ausencia de esta capacidad en más de la mitad de las organizaciones encuestadas explica en gran medida por qué la adopción de BIM registró apenas el 1 % en la tabla anterior.

En conjunto, los resultados de esta tabla revelan que las organizaciones del sector carecen de las capacidades tecnológicas de conectividad e integración necesarias para sostener una transformación digital profunda en el control de proyectos. Esta situación no solo limita la implementación de herramientas avanzadas como la IA y BIM, sino que también restringe la capacidad de generar trazabilidad en tiempo real, anticipar riesgos y tomar decisiones informadas durante la ejecución de las obras. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de que las estrategias propuestas en esta investigación contemplen no solo la adopción de herramientas tecnológicas específicas, sino también el fortalecimiento de la infraestructura de conectividad e integración como condición previa y habilitadora de dicha adopción.

Tabla 11 Nivel de digitalización en la prestación de servicios

Preguntas	*Nulo*	*Bajo*	*Medio*	*Alto*	*Muy alto*	*Columnas*
Nivel de integración de tecnologías digitales en la prestación de servicios	15.10 %	24.50 %	30.20 %	20.80 %	9.40 %	
Uso de herramientas digitales para mejorar la eficiencia en la prestación de servicios	3.80 %	13.20 %	41.50 %	32.10 %	9.40 %	
Registran datos o información del proceso de prestación de servicios	5.70 %	9.40 %	32.10 %	39.60 %	13.20 %	
Aprovecha los datos y análisis digitales para tomar decisiones en la prestación de servicios	3.80 %	17.00 %	34.00 %	35.80 %	9.40 %	
Nivel de adopción de tecnologías de automización en la entrega de servicios	11.30 %	17.00 %	34.00 %	30.20 %	7.50 %	
Digitalización de la gestión de datos y registros en nuestra empresa de servicios	7.50 %	17.00 %	37.70 %	28.30 %	9.40 %	

Esta tabla examina el grado de digitalización en los procesos de prestación de servicios de las organizaciones encuestadas, evaluando seis dimensiones que van desde la integración de tecnologías digitales hasta la automatización y gestión de datos. A diferencia de las tablas anteriores, los resultados de esta tabla muestran un panorama relativamente más favorable, con una distribución más equilibrada hacia los niveles medios y altos.

El rasgo más destacado es que en todos los ítems el nivel medio concentra el mayor porcentaje de respuestas, oscilando entre el 30.20 % y el 41.50 %, lo que confirma que las organizaciones han alcanzado un estadio intermedio de digitalización en sus procesos de servicio, pero sin consolidar prácticas de alto impacto de manera generalizada.

El ítem de uso de herramientas digitales para mejorar la eficiencia en la prestación de servicios presenta el mejor desempeño de la tabla, con el 41.50 % en nivel medio y el 32.10 % en alto, acumulando un 73.60 % entre estos dos niveles y apenas un 3.80 % en nulo. Este resultado indica que la digitalización orientada a la eficiencia operativa es la dimensión más avanzada en el sector, lo que es coherente con los hallazgos de tablas anteriores donde la inversión tecnológica en producción y operación era la más alta.

El registro de datos e información del proceso de prestación de servicios muestra igualmente un comportamiento positivo, con el 52.80 % entre alto y muy alto, siendo uno de los ítems con mayor concentración en los niveles superiores. En el contexto de proyectos de infraestructura vial, esta capacidad es fundamental para la trazabilidad de las decisiones técnicas y financieras durante la ejecución, y su relativo avance representa una base aprovechable para implementar sistemas de análisis más sofisticados.

El ítem de aprovechamiento de datos y análisis digitales para la toma de decisiones registra el 45.20 % entre alto y muy alto, lo que sugiere que una porción significativa de las organizaciones ya utiliza datos digitales como insumo para sus decisiones operativas. Sin embargo, el 17.00 % en nivel bajo y el 3.80 % en nulo indican que todavía existe una fracción relevante del sector que no ha incorporado esta práctica, lo que genera asimetrías importantes en la capacidad de gestión basada en evidencia.

El nivel de integración de tecnologías digitales en la prestación de servicios muestra una distribución más heterogénea, con el 39.60 % entre nulo y bajo, y solo el 30.20 % entre alto y muy alto. Este resultado refleja que la integración tecnológica plena en los procesos de servicio sigue siendo un desafío para una parte considerable del sector, lo que limita la capacidad de generar sinergias entre las distintas herramientas digitales disponibles.

El nivel de adopción de tecnologías de automatización en la entrega de servicios registra el 28.30 % entre nulo y bajo, con apenas el 7.50 % en muy alto. La automatización es una de las dimensiones con mayor potencial para transformar el control de proyectos viales, ya que permite reducir la dependencia de procesos manuales propensos a errores y retrasos. Su bajo nivel de adopción representa por tanto una de las brechas más importantes a cerrar en el camino hacia una gestión más eficiente y transparente.

Finalmente, la digitalización de la gestión de datos y registros muestra que el 37.70 % se ubica en nivel medio y el 37.70 % entre alto y muy alto, con un 24.50 % entre nulo y bajo. Este resultado sugiere que la gestión documental digital ha avanzado de manera moderada, pero sin alcanzar los niveles necesarios para garantizar la trazabilidad completa que exige el control riguroso de proyectos de infraestructura.

En conjunto, esta tabla revela que la digitalización de los procesos de servicio se encuentra en un nivel intermedio de desarrollo, con fortalezas relativas en el registro de datos y el uso de herramientas de eficiencia, pero con rezagos importantes en automatización, integración tecnológica y aprovechamiento pleno de los datos para la toma de decisiones. Estos hallazgos son consistentes con la necesidad identificada en esta investigación de fortalecer no solo la disponibilidad de herramientas tecnológicas, sino también las capacidades organizacionales para utilizarlas de manera integrada y estratégica en el control de proyectos viales.

Tabla 12 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización

¿Con cual de las siguientes areas dentro de la organzación se comunica utilizando sistemas de información?					
Preguntas	***Si***	***Parcialmente***	***No***	***El área no existe***	***Columnas***
Investigación y desarrollo	21.90 %	35.60 %	11.00 %	31.50 %	
Producción de productos o servicios	37.00 %	41.10 %	8.20 %	13.70 %	
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano)	43.80 %	42.50 %	8.20 %	5.00 %	
Logística de recepción y distribución	37.00 %	38.40 %	12.30 %	12.30 %	
Comercial y ventas	31.50 %	45.20 %	15.10 %	8.20 %	

Esta tabla examina el grado en que las organizaciones utilizan sistemas de información para comunicarse internamente entre sus diferentes áreas funcionales. Los resultados son relevantes porque la comunicación digital integrada entre dependencias es una condición previa para implementar plataformas de gestión colaborativa como BIM, y para garantizar la coherencia y trazabilidad de la información en los proyectos.

El hallazgo más positivo de esta tabla es que en todas las áreas evaluadas la suma de las categorías "sí" y "parcialmente" supera el 75 %, lo que indica que la comunicación mediante

sistemas de información tiene una penetración relativamente amplia en las organizaciones del sector, aunque con importantes matices según el área específica.

Los procesos administrativos internos como contabilidad y talento humano presentan el mejor desempeño, con el 43.80 % que sí utiliza sistemas de información para comunicarse y el 42.50 % que lo hace parcialmente, acumulando el 86.30 % entre ambas categorías y el porcentaje más bajo de "el área no existe" (5.00 %). Este resultado es coherente con los hallazgos previos, donde la digitalización administrativa mostraba mayor madurez que la digitalización operativa y técnica.

La producción de productos o servicios y la logística de recepción y distribución muestran comportamientos similares, con alrededor del 75 % entre "sí" y "parcialmente". Sin embargo, el porcentaje de comunicación parcial supera al de comunicación plena en ambos casos, lo que indica que la integración de sistemas de información en estos procesos todavía no es completa ni sistemática.

El área comercial y de ventas registra el mayor porcentaje en la categoría "parcialmente" (45.20 %), con solo el 31.50 % que comunica plenamente mediante sistemas de información. Este resultado sugiere que, a pesar de ser un área con mayor contacto con clientes y donde la digitalización de la comunicación debería estar más avanzada, la integración de sistemas de información sigue siendo incompleta en una proporción importante de las organizaciones.

El caso más preocupante es el área de investigación y desarrollo, que no solo tiene el porcentaje más alto de comunicación nula (11.00 %), sino también el porcentaje más elevado de "el área no existe" (31.50 %), lo que significa que casi un tercio de las organizaciones

encuestadas ni siquiera cuenta con una unidad de investigación y desarrollo. Este hallazgo es crítico en el contexto de esta investigación, ya que confirma que la innovación tecnológica aplicada al control de proyectos viales no es una prioridad estructural para la mayoría de las organizaciones del sector, lo que limita severamente su capacidad de adoptar y adaptar herramientas emergentes como la IA, la ciencia de datos y BIM.

En términos generales, los resultados de esta tabla revelan que la comunicación interna mediante sistemas de información está más avanzada en las áreas administrativas y operativas tradicionales, mientras que las áreas con mayor potencial innovador, como investigación y desarrollo, presentan los mayores déficits tanto en la existencia del área como en su integración digital. Esta situación refleja una estructura organizacional que prioriza la eficiencia operativa sobre la innovación, lo que representa uno de los obstáculos culturales e institucionales más importantes para la transformación digital del sector y para la implementación de las estrategias propuestas en esta investigación.

Tabla 13 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización

¿Con cual de las siguientes areas de clientes y proveedores se comunica utilizando sistemas de información?					
Preguntas	***Si***	***Parcialmente***	***No***	***El área no existe***	***Columnas***
Investigación y desarrollo	11.00 %	41.10 %	12.30 %	35.60 %	
Producción de productos o servicios	34.20 %	38.40 %	15.10 %	12.30 %	
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano)	38.40 %	43.80 %	6.80 %	11.00 %	
Logística de recepción y distribución	32.90 %	41.10 %	13.70 %	12.30 %	
Comercial y ventas	32.90 %	42.50 %	13.70 %	11.00 %	

Esta tabla complementa directamente la anterior al evaluar el mismo fenómeno pero en la dimensión externa, es decir, el grado en que las organizaciones utilizan sistemas de información para comunicarse con sus clientes y proveedores desde cada área funcional. La comparación

entre ambas tablas permite identificar brechas importantes entre la comunicación digital interna y externa.

El primer hallazgo relevante es que en todas las áreas los porcentajes de comunicación plena ("sí") son menores en esta tabla que en la anterior, lo que confirma que la integración digital con actores externos es sistemáticamente más débil que la comunicación interna. Esta brecha es especialmente significativa en el contexto de proyectos de infraestructura vial, donde la coordinación efectiva con proveedores, contratistas y entidades supervisoras es tan determinante como la gestión interna para garantizar el control exitoso de las obras.

Los procesos administrativos internos vuelven a mostrar el mejor desempeño, con el 38.40 % que sí utiliza sistemas de información para comunicarse externamente y el 43.80 % que lo hace parcialmente, acumulando el 82.20 % entre ambas categorías. Aunque este resultado es positivo, la reducción respecto al 86.30 % de comunicación interna en la misma área indica que incluso en la dimensión administrativa más madura la comunicación externa presenta rezagos.

La producción de productos o servicios y la logística de recepción y distribución registran comportamientos similares, con alrededor del 73 % entre "sí" y "parcialmente". Sin embargo, ambas áreas presentan porcentajes de comunicación nula superiores al 13 %, lo que indica que una fracción relevante de las organizaciones no ha establecido canales digitales de comunicación con sus clientes y proveedores en estos procesos, precisamente donde la coordinación externa es más crítica para la ejecución eficiente de los proyectos.

El área comercial y ventas muestra una distribución similar a la logística, con el 32.90 % en "sí" y el 42.50 % en "parcialmente". El hecho de que el área comercial, que por definición

tiene mayor interacción con clientes, no alcance niveles más altos de comunicación digital plena refuerza la conclusión de que la integración de sistemas de información en la gestión de relaciones externas sigue siendo una deuda pendiente en el sector.

El caso más crítico nuevamente es investigación y desarrollo, con el porcentaje más alto de "el área no existe" (35.60 %), incluso ligeramente superior al registrado en la tabla anterior (31.50 %), y apenas el 11.00 % que comunica plenamente con clientes y proveedores mediante sistemas de información. Este resultado confirma que las organizaciones que sí cuentan con áreas de I+D no han logrado integrarlas digitalmente en su cadena de valor externa, lo que limita la transferencia de conocimiento y la colaboración en innovación con actores del ecosistema.

Comparando globalmente las Tablas 9 y 10, se observa una reducción consistente en los porcentajes de comunicación plena en todas las áreas al pasar de la dimensión interna a la externa, acompañada de un incremento en los porcentajes de "el área no existe" y comunicación nula. Esta tendencia evidencia que la transformación digital de las organizaciones del sector ha avanzado de adentro hacia afuera de manera desigual, consolidando primero los procesos administrativos internos pero sin lograr extender esa integración hacia la cadena de valor externa de manera sistemática. En el marco de esta investigación, este hallazgo subraya la importancia de que las estrategias de implementación de IA, ciencia de datos y BIM contemplen explícitamente la dimensión de interoperabilidad y comunicación digital entre todos los actores del ecosistema de proyectos viales, no solo al interior de cada organización.

Tabla 14 Comunicación mediante sistemas de información entre áreas de la organización

¿La organización, ya está tilizando servicios en la nube?				
Preguntas	***Si***	***No pero lo planeamos***	***No***	***Columnas***
Sofware desde la nube	69.90 %	17.80 %	12.30 %	
Para almacenamiento de datos	69.90 %	13.70 %	5.50 %	
Para evaluación de datos	46.60 %	28.80 %	24.70 %	

Esta tabla es una de las más positivas del conjunto de resultados, ya que revela que el uso de servicios en la nube tiene una penetración considerablemente mayor que otras tecnologías evaluadas anteriormente, lo que representa una base de infraestructura digital aprovechable para la implementación de soluciones más avanzadas.

El dato más destacado es que tanto el software desde la nube como el almacenamiento de datos en la nube registran exactamente el mismo porcentaje de adopción actual, con un 69.90 % que ya utiliza estos servicios. Estos son los porcentajes afirmativos más altos de toda la investigación, lo que contrasta notablemente con los bajos niveles de adopción de tecnologías como la IA (4 %), BIM (1 %) y la comunicación M2M (5.50 %) identificados en tablas anteriores. Este resultado indica que la nube se ha convertido en la tecnología digital de mayor penetración en el sector, posiblemente impulsada por la masificación de herramientas de productividad y colaboración basadas en este modelo.

El porcentaje de organizaciones que no utiliza software desde la nube pero planea hacerlo (17.80 %) sugiere que la adopción seguirá creciendo en el corto plazo, ya que sumado al 69.90 % actual representa un potencial de adopción del 87.70 %. De manera similar, el almacenamiento en la nube tiene un potencial de adopción del 83.60 % al sumar quienes ya lo usan con quienes lo planean, y apenas un 5.50 % que no lo utiliza ni lo contempla, el porcentaje de rechazo más bajo de esta tabla.

Sin embargo, el ítem de evaluación de datos en la nube muestra un comportamiento significativamente diferente, con solo el 46.60 % que ya lo utiliza, el 28.80 % que lo planea y el 24.70 % que no lo hace ni lo contempla. Esta brecha entre el uso de la nube para almacenamiento y software respecto a su uso para análisis y evaluación de datos es un hallazgo clave para esta investigación, ya que evidencia que las organizaciones han adoptado la nube principalmente como repositorio y plataforma de herramientas, pero no han avanzado hacia su uso como infraestructura de análisis e inteligencia de datos, que es precisamente la dimensión más relevante para el control predictivo de proyectos viales.

Esta distinción es crítica porque el aprovechamiento pleno del potencial de la IA y la ciencia de datos en el control de proyectos requiere no solo almacenar datos en la nube, sino procesarlos y analizarlos en ese entorno para generar modelos predictivos, alertas tempranas y dashboards de seguimiento en tiempo real. El hecho de que menos de la mitad de las organizaciones haya dado este paso representa una barrera tecnológica importante, aunque el 28.80 % que planea hacerlo indica que existe una trayectoria de adopción en curso que las estrategias propuestas en esta investigación pueden aprovechar y acelerar.

En síntesis, los resultados de esta tabla revelan una paradoja relevante: el sector cuenta con una infraestructura de nube relativamente desarrollada en términos de software y almacenamiento, pero no la está aprovechando plenamente para el análisis de datos. Cerrar esta brecha entre la disponibilidad de infraestructura y su uso estratégico para la toma de decisiones representa una de las oportunidades más inmediatas y concretas para avanzar hacia un control más inteligente y eficiente de los proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Tabla 15 Organización de la gestión de tecnologías de la información

¿Cómo está organizada su gestión en tecnologías de la información - TI?	
Sin departamento de TI propio (Implicación de un proveedor de servicios)	65.80 %
Departamento central de TI	23.30 %
Departamento de TI descentralizado en las áreas especializadas	6.80 %
Expertos en TI integrados en los departamentos especializados	4.10 %

Esta tabla revela la estructura organizacional con la que las empresas del sector gestionan sus tecnologías de la información, y sus resultados tienen implicaciones directas sobre la capacidad institucional para adoptar e implementar soluciones tecnológicas avanzadas como las propuestas en esta investigación.

El hallazgo más significativo es que el 65.80 % de las organizaciones no cuenta con un departamento de TI propio y depende de proveedores externos de servicios para gestionar sus necesidades tecnológicas. Este es el dato individual más revelador de toda la tabla y uno de los más importantes del conjunto de resultados, ya que explica de manera estructural muchos de los déficits identificados en tablas anteriores. Una organización que externaliza completamente su gestión tecnológica tiene una capacidad limitada para personalizar, integrar y escalar soluciones digitales según sus necesidades específicas, y es más vulnerable a discontinuidades en la adopción tecnológica cuando cambian los proveedores o los contratos de servicio.

En el contexto de proyectos de infraestructura vial, esta dependencia externa es especialmente crítica porque la implementación efectiva de herramientas como la IA, la ciencia de datos y BIM requiere no solo contratar un software, sino desarrollar capacidades internas de gestión, configuración, mantenimiento y evolución de dichas herramientas. Sin un equipo propio de TI, las organizaciones carecen de la autonomía técnica necesaria para adaptar estas tecnologías a los requerimientos específicos del control de obras viales.

Solo el 23.30 % cuenta con un departamento central de TI, lo que representa la única modalidad de gestión tecnológica interna con cierta escala y capacidad de respuesta institucional. Sin embargo, un departamento centralizado puede presentar limitaciones de agilidad y proximidad con las necesidades específicas de cada área operativa, lo que en proyectos viales de campo puede traducirse en respuestas lentas ante requerimientos técnicos urgentes.

Las modalidades más avanzadas y especializadas de gestión de TI, como los departamentos descentralizados en áreas especializadas (6.80 %) y los expertos en TI integrados en los departamentos especializados (4.10 %), tienen una presencia marginal en el sector. Estas dos modalidades son precisamente las más adecuadas para implementar soluciones tecnológicas sofisticadas como BIM y la IA, ya que permiten que el conocimiento técnico esté distribuido y contextualizado en las áreas que más lo necesitan, como interventoría, control de costos y seguimiento de cronogramas.

La suma de estas dos últimas categorías apenas alcanza el 10.90 %, lo que indica que menos de una de cada diez organizaciones cuenta con una estructura de TI suficientemente especializada y distribuida para soportar una transformación digital profunda. Este hallazgo es coherente con la baja adopción de tecnologías avanzadas identificada en tablas anteriores y añade una dimensión organizacional y de gobernanza tecnológica a los déficits ya documentados.

En conjunto, los resultados de esta tabla revelan que la debilidad en la adopción de tecnologías emergentes en el sector no es únicamente un problema de recursos financieros o de disponibilidad de herramientas, sino también un problema de estructura organizacional. La ausencia de capacidades internas de TI en la mayoría de las organizaciones limita su capacidad

de innovar, integrar y sostener soluciones tecnológicas en el tiempo. Por tanto, las estrategias propuestas en esta investigación deberán contemplar no solo la adopción de herramientas específicas, sino también el fortalecimiento de las capacidades institucionales de gestión tecnológica como condición habilitadora para una transformación digital sostenible en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Tabla 16 Nivel de cumplimiento en equipos e infraestructura tecnológica

	Nivel de cumplimiento					
Preguntas	***Nulo***	***Bajo***	***Medio***	***Alto***	***Muy alto***	***Columnas***
Equipos de ultima tecnología	8.20 %	21.90 %	43.80 %	24.70 %	1.40 %	
Equipos o maquinas conectadas a servidores	17.80 %	17.80 %	35.60 %	26.00 %	2.70 %	

Esta tabla evalúa el nivel de cumplimiento en dos dimensiones de infraestructura tecnológica física: la disponibilidad de equipos de última tecnología y la conectividad de equipos o máquinas a servidores. Aunque es una tabla de solo dos ítems, sus resultados son relevantes para comprender las condiciones materiales sobre las cuales se sustenta la transformación digital del sector.

En cuanto a la disponibilidad de equipos de última tecnología, el 43.80 % de los encuestados reporta un nivel de cumplimiento medio, seguido por el 24.70 % en alto y el 21.90 % en bajo. El porcentaje acumulado entre medio y muy alto alcanza el 70.00 %, lo que sugiere que la mayoría de las organizaciones cuenta con una base de equipamiento tecnológico aceptable. Sin embargo, el porcentaje de nivel muy alto es apenas del 1.40 %, lo que indica que la disponibilidad de equipos de vanguardia es prácticamente excepcional en el sector. En el contexto de proyectos de infraestructura vial, donde las condiciones de campo requieren equipos robustos y de alto rendimiento para el procesamiento de datos en tiempo real, este nivel de

cumplimiento moderado puede representar una limitación práctica para la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas.

La conectividad de equipos o máquinas a servidores presenta un comportamiento ligeramente más heterogéneo, con el 35.60 % en nivel medio y el 26.00 % en alto, pero con un porcentaje de cumplimiento nulo del 17.80 %, considerablemente mayor que el 8.20 % registrado para equipos de última tecnología. Este dato es especialmente relevante porque la conectividad a servidores es la condición técnica básica para implementar sistemas de monitoreo remoto, alimentar plataformas de gestión en tiempo real y habilitar la comunicación M2M identificada como prácticamente ausente en la Tabla 7. El hecho de que casi una de cada cinco organizaciones reporte cumplimiento nulo en esta dimensión confirma que las brechas de infraestructura de conectividad son uno de los obstáculos más concretos y tangibles para la digitalización del control de proyectos.

Comparando ambos ítems, se observa que las organizaciones tienen mayor cumplimiento en la disponibilidad de equipos que en su conectividad a servidores, lo que sugiere una inversión desbalanceada: se adquieren equipos pero no se desarrolla la infraestructura de red necesaria para aprovecharlos plenamente. Esta situación es coherente con la paradoja identificada en la Tabla 11, donde las organizaciones usan la nube para almacenamiento pero no para análisis de datos, evidenciando un patrón recurrente de adopción parcial de la infraestructura tecnológica disponible.

En síntesis, aunque el sector cuenta con un nivel moderado de equipamiento tecnológico, las deficiencias en conectividad a servidores representan una barrera concreta que debe ser abordada como parte de cualquier estrategia de implementación de IA, ciencia de datos y BIM en

el control de proyectos viales. Sin una infraestructura de conectividad robusta y generalizada, las herramientas tecnológicas más avanzadas no pueden desplegarse de manera efectiva ni sostenida en los entornos de campo donde se ejecutan las obras.

Tabla 17 Seguridad de la información en el contexto de la transformación digital

Preguntas	*Totalmente en desacuerdo*	*Parcialmente en desacuerdo*	*Ni de acuerdo, ni en desacuerdo*	*Parcialmente de acuerdo*	*Totalmente de acuerdo*	*Columnas*
La información de su organización se encuentra segura en el contexto de la transformación digital	4.10 %	19.20 %	32.90 %	28.80 %	15.10 %	
Realiza evaluaciones y auditorías de seguridad de la información en su organización como parte de la estrategia de transformación digital	16.40 %	16.40 %	24.70 %	28.80 %	13.70 %	
Promueve la conciencia y la capcitación en seguriad de la información entre los empleados de acuerdo a la transformación digital	9.60 %	12.30 %	28.80 %	24.70 %	24.70 %	
Las medidas de respuesta ante incidentes de seguridad de la información en su organización son efectivas	13.70 %	16.40 %	32.90 %	21.90 %	15.10 %	

Esta tabla evalúa las percepciones y prácticas de las organizaciones en materia de seguridad de la información, una dimensión crítica que con frecuencia es subestimada en los procesos de transformación digital pero que resulta indispensable para garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos en el control de proyectos de infraestructura vial.

Un patrón transversal a los cuatro ítems es la alta concentración de respuestas en las categorías intermedias, particularmente "ni de acuerdo ni en desacuerdo" y "parcialmente de acuerdo", lo que refleja una percepción ambigua e inconsistente sobre la seguridad de la información en el sector. Esta ambigüedad puede interpretarse como una señal de que las organizaciones no tienen claridad sobre el estado real de su seguridad digital, lo que en sí mismo representa un riesgo.

Respecto a la percepción de que la información de la organización se encuentra segura en el contexto de la transformación digital, apenas el 43.90 % expresa algún nivel de acuerdo (parcial o total), mientras que el 23.30 % manifiesta algún nivel de desacuerdo y el 32.90 % no toma posición. Este resultado es preocupante porque indica que más de la mitad de los encuestados no tiene certeza sobre la seguridad de su información digital, lo que representa una vulnerabilidad significativa especialmente en organizaciones que manejan datos sensibles de proyectos públicos de infraestructura.

El ítem de evaluaciones y auditorías de seguridad de la información presenta el porcentaje más alto de desacuerdo total (16.40 %), igualado por el desacuerdo parcial (16.40 %), acumulando el 32.80 % en niveles de desacuerdo. Esto indica que casi un tercio de las organizaciones reconoce explícitamente que no realiza evaluaciones sistemáticas de seguridad como parte de su estrategia de transformación digital, lo que es coherente con la baja presencia de departamentos de TI propios identificada en la Tabla 12 y con los bajos niveles de inversión en sistemas de información de las tablas anteriores.

La promoción de conciencia y capacitación en seguridad de la información muestra el mejor desempeño de la tabla, con el 49.40 % entre parcial y totalmente de acuerdo, y apenas el 21.90 % en niveles de desacuerdo. Este resultado sugiere que la sensibilización sobre seguridad digital tiene mayor penetración que las prácticas formales de auditoría y protección, lo que indica un avance en la cultura de seguridad pero sin el respaldo de mecanismos técnicos y procedimentales suficientes.

Finalmente, la percepción sobre la efectividad de las medidas de respuesta ante incidentes de seguridad muestra que el 37.00 % expresa algún nivel de acuerdo, pero el 30.10 % manifiesta

desacuerdo en algún grado y el 32.90 % no toma posición. Este equilibrio entre acuerdo y desacuerdo, combinado con la alta proporción de respuestas neutras, sugiere que las organizaciones no tienen plena confianza en su capacidad de respuesta ante incidentes de seguridad, lo que representa una vulnerabilidad operativa importante en el contexto de proyectos de infraestructura pública donde la integridad de los datos contractuales y técnicos es crítica.

En conjunto, los resultados de esta tabla revelan que la seguridad de la información es una dimensión débil y poco consolidada en la gestión tecnológica del sector. Las organizaciones muestran avances modestos en sensibilización pero déficits importantes en prácticas formales de auditoría, evaluación y respuesta ante incidentes. Este hallazgo es especialmente relevante para esta investigación porque la implementación de herramientas de IA, ciencia de datos y BIM implica el manejo de grandes volúmenes de información sensible sobre proyectos públicos, contratos, presupuestos y avances de obra, cuya protección debe estar garantizada como condición ética, legal y operativa para el éxito de cualquier estrategia de transformación digital en el sector vial colombiano.

Tabla 18 Método de registro de la información generada por los procesos organizacionales

¿Cómo realiza la organización el registro de la información generada por los procesos (producción, comercial, calidad, mantenimiento, administración, etc.)?	
No registra información de los procesos	15.10 %
Todos los procesos se registran en papel	5.50 %
Algunos procesos se registran en papel y otros están digitalizados	47.90 %
Todos los procesos están completamente digitalizados	31.50 %

Esta tabla ofrece una visión directa y concreta sobre el estado de la digitalización documental en las organizaciones del sector, evaluando cómo se registra la información generada

por los procesos productivos, comerciales, de calidad, mantenimiento y administrativos. Sus resultados son especialmente relevantes para esta investigación porque el registro sistemático y digital de la información es la base sobre la cual se pueden construir sistemas de análisis de datos, modelos predictivos y plataformas de control en tiempo real.

El hallazgo más significativo es que el 47.90 % de las organizaciones utiliza un modelo híbrido, registrando algunos procesos en papel y otros de forma digitalizada. Este resultado, que representa casi la mitad de los encuestados, confirma el patrón de digitalización parcial e inconsistente que ha sido una constante a lo largo de todos los resultados. En el contexto de proyectos de infraestructura vial, esta coexistencia de registros físicos y digitales genera fragmentación en la información, dificulta la trazabilidad completa de las decisiones técnicas y financieras, e impide la integración de datos en plataformas de gestión centralizada.

El 31.50 % reporta que todos sus procesos están completamente digitalizados, lo que representa una base positiva y aprovechable para la implementación de herramientas más avanzadas. Este segmento de organizaciones constituye el grupo con mayor potencial para adoptar soluciones de IA, ciencia de datos y BIM en el corto plazo, ya que ya cuenta con la infraestructura documental digital necesaria como punto de partida.

En contraste, el 5.50 % aún registra todos sus procesos en papel, lo que en pleno contexto de transformación digital representa un rezago extremo que compromete cualquier posibilidad de integración tecnológica. Aunque este porcentaje es minoritario, su existencia en el sector de la infraestructura vial, donde los volúmenes de documentación técnica y contractual son considerables, tiene implicaciones directas sobre la calidad del control y la transparencia de la gestión.

El dato más preocupante es que el 15.10 % de las organizaciones no registra información de sus procesos, ni en papel ni de forma digital. Este porcentaje, que equivale a aproximadamente una de cada siete organizaciones encuestadas, representa la brecha más crítica identificada en esta tabla. La ausencia total de registro de información implica que no existe trazabilidad alguna sobre la ejecución de los procesos, lo que hace imposible cualquier forma de control, auditoría o mejora continua, y representa una vulnerabilidad grave en términos de transparencia y rendición de cuentas en la gestión de proyectos públicos.

Sumando las organizaciones que no registran información, las que lo hacen exclusivamente en papel y las que tienen un modelo híbrido, se obtiene que el 68.50 % del sector no cuenta con una digitalización completa de sus registros de proceso. Este dato consolida uno de los hallazgos más importantes de esta investigación: la transformación digital del control de proyectos viales en Colombia no puede limitarse a la implementación de herramientas avanzadas como la IA o BIM, sino que debe partir de un proceso previo de digitalización básica y estandarización del registro de información en las organizaciones del sector. Sin esta base documental digital, las tecnologías más sofisticadas no tienen los datos necesarios para operar de manera efectiva.

En síntesis, esta tabla refuerza la necesidad de que las estrategias propuestas en esta investigación contemplen una ruta de implementación gradual y escalonada, que comience por consolidar la digitalización completa de los registros de proceso antes de avanzar hacia modelos de análisis predictivo y control inteligente basado en datos.

Tabla 19 Disponibilidad de roles especializados en transformación digital

¿Dispone de alguna persona en la organización responsable de la transformación digital?	
No dispone de roles especializados	42.50 %
Se dispone de un rol especializado	43.80 %
Se dispone de varios roles especializados	12.30 %
Se dispone de una gran especialización de roles digitales claves para la industria 4.0	1.40 %

Esta tabla cierra el conjunto de resultados evaluando una dimensión fundamental para la sostenibilidad de cualquier proceso de transformación digital: la existencia de talento humano especializado responsable de liderar y gestionar dicha transformación al interior de las organizaciones. Sus resultados son especialmente relevantes porque confirman que las brechas tecnológicas identificadas a lo largo de esta investigación tienen una raíz profunda en la estructura del capital humano del sector.

El hallazgo más contundente es la distribución casi equitativa entre las organizaciones que no disponen de roles especializados (42.50 %) y las que disponen de un solo rol especializado (43.80 %), concentrando entre ambas categorías el 86.30 % de los encuestados. Esta distribución revela que el sector se encuentra en un punto de inflexión: casi la mitad de las organizaciones aún no ha institucionalizado la responsabilidad de la transformación digital, mientras que la otra mitad ha dado un primer paso al designar a una persona, aunque sin contar aún con un equipo estructurado para ello.

La ausencia de roles especializados en el 42.50 % de las organizaciones es coherente con el 65.80 % que no cuenta con departamento de TI propio identificado en la Tabla 12, y explica en gran medida los bajos niveles de adopción de tecnologías avanzadas documentados a lo largo de toda la investigación. Sin un responsable interno que lidere, planifique y gestione la

transformación digital, las iniciativas tecnológicas tienden a ser reactivas, discontinuas y dependientes de proveedores externos, lo que limita su impacto y sostenibilidad en el tiempo.

La disponibilidad de varios roles especializados alcanza apenas el 12.30 %, lo que indica que solo una minoría de las organizaciones ha construido equipos dedicados a la transformación digital con suficiente masa crítica para abordar proyectos de mayor complejidad tecnológica. En el contexto de la implementación de IA, ciencia de datos y BIM en proyectos viales, donde la integración de múltiples plataformas y la gestión de grandes volúmenes de datos requiere competencias diversas y complementarias, esta escasez de equipos especializados representa una barrera significativa.

El nivel más avanzado, correspondiente a organizaciones que cuentan con una gran especialización de roles digitales clave, registra apenas el 1.40 %, el porcentaje más bajo de toda la tabla y uno de los más bajos de toda la investigación. Este dato confirma que la madurez organizacional en materia de talento digital es prácticamente inexistente en el sector, y que la brecha entre las organizaciones más avanzadas y el resto es considerablemente amplia.

Visto en perspectiva con el conjunto de resultados, esta tabla ofrece una conclusión integradora fundamental: las brechas tecnológicas identificadas a lo largo de todas las tablas anteriores, que abarcan desde la baja adopción de IA y BIM hasta la fragmentación documental y los déficits de conectividad, tienen como denominador común la ausencia de talento humano especializado que lidere, gestione y sostenga la transformación digital de manera estratégica. Sin personas con las competencias adecuadas para implementar, operar y evolucionar las herramientas tecnológicas, ninguna inversión en infraestructura o software será suficiente para transformar estructuralmente el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Por tanto, las estrategias propuestas en esta investigación deberán contemplar de manera explícita el desarrollo de capacidades humanas en transformación digital como uno de sus ejes centrales, reconociendo que la tecnología y el talento son condiciones igualmente indispensables y complementarias para lograr una gestión más eficiente, transparente y sostenible de los proyectos viales en el país.

Tabla 20 Nivel de capacitación del talento humano en competencias para la transformación digital

Preguntas	*Irrelevante / No aplica*	*No capacitado*	*Capacitado, pero no lo suficiente*	*Capacitado suficiente y constantemente*	*Columnas*
Infraestructura	9.90 %	21.10 %	47.90 %	21.10 %	
Tecnología de automatización	13.90 %	27.80 %	44.40 %	13.90 %	
Análisis de datos	9.70 %	22.20 %	51.40 %	16.70 %	
Seguridad de datos	12.50 %	23.60 %	43.10 %	20.80 %	
Seguridad de las comunicaciones	14.10 %	25.40 %	43.70 %	16.90 %	
Software de colaboración	12.50 %	20.80 %	48.60 %	18.10 %	
Desarrollo o aplicación de sistemas de asistencia	18.10 %	19.40 %	50.00 %	12.50 %	
Habilidades no tecnicas, como el pensamiento sistémico y la comprensión de procesos	15.50 %	22.50 %	43.70 %	18.30 %	

La Tabla 17 analiza el nivel de capacitación del talento humano en competencias clave para la transformación digital, una dimensión crítica dentro del marco de esta investigación, dado que, como se establece en el planteamiento del problema, una de las principales limitaciones en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia es la insuficiente capacidad técnica de los actores encargados de la supervisión e interventoría. En este sentido, el fortalecimiento del capital humano se configura como un habilitador fundamental para la implementación efectiva de herramientas como la inteligencia artificial, la ciencia de datos y la metodología BIM.

Un patrón transversal en todos los ítems de la tabla es la alta concentración de respuestas en la categoría “capacitado, pero no lo suficiente”, con valores que oscilan entre el 43.10 % y el

51.40 %. Este comportamiento evidencia un nivel de madurez intermedio-bajo del talento humano, caracterizado por conocimientos incipientes pero insuficientes para soportar procesos avanzados de analítica, automatización y control digital. Este hallazgo es coherente con lo expuesto en la investigación, donde se señala que existe una brecha significativa en la formación de los profesionales frente a metodologías modernas como BIM, IA y ciencia de datos, lo que limita su adopción efectiva en el sector vial .

En el ámbito de infraestructura, el 47.90 % de los encuestados se percibe con capacitación insuficiente, mientras que solo el 21.10 % considera contar con una formación adecuada. Este resultado sugiere que, incluso en el núcleo técnico del sector, persiste una desactualización en competencias frente a nuevas tecnologías, lo cual dificulta la transición desde modelos tradicionales de control hacia enfoques digitales e integrados.

Respecto a la tecnología de automatización, el 27.80 % de los encuestados declara no estar capacitado y apenas el 13.90 % se considera suficientemente preparado. Esta situación refleja una debilidad estructural en la adopción de herramientas que permiten optimizar procesos operativos, lo cual es crítico si se considera que la automatización es un componente esencial para mejorar la eficiencia en la ejecución y seguimiento de proyectos, tal como lo plantea el marco teórico de la investigación.

El caso de análisis de datos es particularmente crítico: el 51.40 % reporta capacitación insuficiente y el 22.20 % no cuenta con formación en esta área. Este resultado evidencia una de las principales barreras para la implementación de estrategias basadas en ciencia de datos, considerando que, como se plantea en el documento, la capacidad de procesar grandes

volúmenes de información es clave para anticipar riesgos, detectar desviaciones y mejorar la toma de decisiones en proyectos viales .

En seguridad de datos y seguridad de las comunicaciones, más del 65 % de los encuestados se concentra entre niveles de no capacitación y capacitación insuficiente. Este hallazgo refuerza los resultados de la Tabla 14, donde se evidenciaban debilidades en la gestión de la seguridad de la información, y confirma que estas falencias no solo son tecnológicas, sino también competenciales, lo que incrementa la vulnerabilidad de los sistemas de información utilizados en el control de proyectos.

En relación con el software de colaboración, el 48.60 % presenta capacitación insuficiente, lo que limita la capacidad de trabajo articulado entre actores del proyecto. Esto es especialmente relevante en el contexto de BIM, cuya efectividad depende de la interoperabilidad y colaboración en entornos digitales integrados, aspecto central en la propuesta de transformación digital planteada en la investigación.

El ítem de desarrollo o aplicación de sistemas de asistencia muestra uno de los niveles más bajos de capacitación suficiente (12.50 %), evidenciando una brecha significativa en capacidades avanzadas de innovación tecnológica. Esta limitación es crítica, ya que restringe la posibilidad de desarrollar soluciones propias adaptadas a las necesidades del contexto colombiano, perpetuando la dependencia de herramientas externas y limitando la escalabilidad de la transformación digital.

Finalmente, las habilidades no técnicas, como el pensamiento sistémico y la comprensión de procesos, presentan también niveles insuficientes (43.70 %). Este resultado es particularmente

relevante desde el enfoque de gestión de proyectos, ya que estas competencias son fundamentales para integrar tecnología, procesos y estrategia, y para transitar hacia modelos de control basados en datos y toma de decisiones informada.

En conjunto, los resultados de la tabla evidencian que el sector presenta una brecha estructural en el desarrollo del talento humano, lo que constituye una de las principales limitaciones para la modernización del control de proyectos de infraestructura vial. Tal como se plantea en la investigación, la transformación digital no depende exclusivamente de la disponibilidad tecnológica, sino de la capacidad de las organizaciones para adoptar, gestionar y aprovechar dichas tecnologías de manera efectiva.

Este hallazgo tiene implicaciones directas sobre la hipótesis del estudio, ya que pone en evidencia que la implementación de herramientas como IA, ciencia de datos y BIM requiere, como condición habilitante, un fortalecimiento integral de las competencias del talento humano. Sin este componente, cualquier esfuerzo de digitalización corre el riesgo de ser parcial, ineficiente o insostenible en el tiempo, limitando el impacto esperado en la mejora del control de costos, tiempos y mecanismos de supervisión en los proyectos viales en Colombia.

Tabla 21 Adopción de sistemas inteligentes para la mejora de ineficiencias en los procesos

¿En qué medida ha abordado las ineficiencias de los procesos mediante la adopción de sistemas inteligentes (máquinas inteligentes, tecnología digital integrada)?	
No hay una adopción significativa de sistemas inteligentes (Aún utilizando sistemas manuales o semiautomáticos)	51.40 %
Sistemas inteligentes introducidos parcialmente en áreas ruciales para superar las ineficiencias locales	37.10 %
Se adaptaron importantes sistemas inteligentes en toda la ampresa que ayudaron a optimizar los procesos	11.40 %

La presente tabla analiza el grado en que las organizaciones han abordado las ineficiencias de sus procesos mediante la adopción de sistemas inteligentes, tales como máquinas inteligentes y tecnologías digitales integradas. Esta variable se relaciona directamente con el eje central de la investigación, en tanto la implementación de herramientas basadas en inteligencia artificial, ciencia de datos y automatización constituye un mecanismo clave para transitar desde modelos tradicionales de control hacia esquemas más eficientes, predictivos y basados en datos.

El resultado más relevante es que el 51.40 % de las organizaciones reporta no contar con una adopción significativa de sistemas inteligentes, manteniendo el uso de sistemas manuales o semiautomáticos. Este hallazgo evidencia una alta dependencia de prácticas tradicionales, lo cual es consistente con el planteamiento del problema, donde se señala que los procesos de control en proyectos de infraestructura vial en Colombia aún presentan rezagos tecnológicos, caracterizados por el uso de reportes manuales, información desactualizada y baja capacidad de análisis en tiempo real . Esta situación limita significativamente la capacidad de las organizaciones para identificar ineficiencias de manera oportuna y tomar decisiones correctivas basadas en información confiable.

Por su parte, el 37.10 % de los encuestados indica que ha introducido sistemas inteligentes de manera parcial en áreas específicas, con el objetivo de superar ineficiencias locales. Este resultado sugiere que existe un proceso incipiente de transformación digital, pero con un enfoque fragmentado y no sistemático. La adopción parcial refleja iniciativas aisladas que, si bien pueden generar mejoras puntuales, no logran transformar estructuralmente los procesos organizacionales. Este comportamiento es coherente con lo evidenciado en otras tablas

del estudio, donde se identifican avances limitados en la digitalización y una falta de integración tecnológica a nivel organizacional.

En contraste, únicamente el 11.40 % de las organizaciones reporta haber implementado sistemas inteligentes de manera integral, logrando optimizar sus procesos a nivel empresarial. Este bajo porcentaje evidencia una brecha significativa en la madurez tecnológica del sector, donde solo una minoría ha logrado consolidar una transformación digital efectiva. Este resultado es especialmente relevante si se considera que, según el marco teórico de la investigación, la integración de tecnologías como IA, ciencia de datos y BIM permite mejorar la eficiencia operativa, reducir desviaciones en costos y tiempos, y fortalecer los mecanismos de control mediante análisis predictivo y monitoreo en tiempo real .

Desde una perspectiva de gestión de proyectos, estos resultados indican que el sector aún se encuentra en una etapa temprana de adopción tecnológica, caracterizada por un enfoque reactivo en lugar de preventivo. La ausencia de sistemas inteligentes limita la capacidad de anticipar riesgos, identificar patrones de falla y optimizar la asignación de recursos, lo que contribuye a las problemáticas identificadas en la investigación, como los sobrecostos, retrasos y deficiencias en la supervisión de obras.

En términos estratégicos, la baja adopción de sistemas inteligentes no solo representa una limitación tecnológica, sino también una debilidad organizacional en la capacidad de innovación y adaptación al cambio. Tal como se plantea en el documento, la transformación digital en el sector de la infraestructura vial requiere no solo inversión en tecnología, sino también cambios en la cultura organizacional, fortalecimiento del talento humano y alineación estratégica desde la alta dirección.

En síntesis, los resultados de esta tabla evidencian que la mayoría de las organizaciones no ha logrado integrar sistemas inteligentes en sus procesos de manera efectiva, lo que constituye una barrera crítica para la modernización del control de proyectos viales. Este hallazgo refuerza la hipótesis de la investigación, al demostrar que la adopción de tecnologías emergentes sigue siendo limitada y que su implementación representa una oportunidad clave para mejorar la eficiencia, la transparencia y la capacidad de respuesta en la gestión de proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Tabla 22 Ambición estratégica de la organización frente a la Industria 4.0

¿Cuál es la ambición estratégica de la organización con respecto al paso a la Industria 4.0?	
No se ha considerado todavía. No se contemplan benficios/oportunidades	49.30 %
Se ha considerado pasar a la Indusrtia 4.0 pero se desconoce como hacerlo	22.50 %
Se conocen los beneficios de la industria 4.0 y se tiene intención de implementarla	25.40 %
Se ha iniciado el proceso de implementación de la industria 4.0	2.80 %

La presente tabla evalúa el nivel de ambición estratégica de las organizaciones respecto a la adopción de los principios de la Industria 4.0, entendida como la integración de tecnologías digitales avanzadas —como inteligencia artificial, analítica de datos, automatización y sistemas ciberfísicos— en los procesos organizacionales. Esta dimensión resulta fundamental dentro de la investigación, ya que la transformación digital en el control de proyectos de infraestructura vial no solo depende de capacidades técnicas y tecnológicas, sino de una visión estratégica clara desde la alta dirección que impulse y oriente dichos procesos.

El resultado más relevante es que el 49.30 % de las organizaciones indica que no ha considerado el paso hacia la Industria 4.0, ni contempla sus beneficios u oportunidades. Este

hallazgo evidencia una ausencia significativa de visión estratégica, lo cual representa una barrera estructural para la modernización del sector. Este comportamiento es consistente con el planteamiento del problema de la investigación, donde se identifica una baja priorización de la transformación digital en la gestión de proyectos viales, lo que limita la adopción de herramientas innovadoras para el control y seguimiento de obras .

Por otro lado, el 22.50 % de los encuestados señala que ha considerado la transición hacia la Industria 4.0, pero desconoce cómo implementarla. Este resultado refleja un nivel incipiente de madurez estratégica, en el que existe cierto grado de reconocimiento de la importancia de la transformación digital, pero sin una hoja de ruta clara para su materialización. Esta situación pone en evidencia debilidades en la planificación estratégica, así como en la capacidad de las organizaciones para estructurar procesos de cambio organizacional alineados con las nuevas tendencias tecnológicas.

En una posición intermedia, el 25.40 % de las organizaciones manifiesta conocer los beneficios de la Industria 4.0 y tener la intención de avanzar en esta dirección. Este grupo representa un segmento con potencial de adopción, ya que cuenta con un nivel de sensibilización y disposición favorable hacia la transformación digital. Sin embargo, la ausencia de implementación efectiva sugiere que aún persisten barreras relacionadas con recursos, capacidades técnicas o liderazgo estratégico, lo que impide materializar dicha intención en acciones concretas.

Finalmente, apenas el 2.80 % de las organizaciones ha iniciado el proceso de implementación de la Industria 4.0, lo que evidencia un nivel extremadamente bajo de adopción real. Este resultado confirma que la transformación digital en el sector de infraestructura vial se

encuentra en una fase temprana o incipiente, donde las iniciativas concretas son escasas y no representan aún una tendencia consolidada.

Desde una perspectiva integral, los resultados de la tabla permiten identificar una brecha crítica entre la conciencia estratégica y la ejecución, donde la mayoría de las organizaciones no solo carece de implementación, sino incluso de una visión clara sobre la relevancia de la Industria 4.0. Esta situación tiene implicaciones directas en la capacidad del sector para mejorar la eficiencia, reducir riesgos y optimizar el control de proyectos, aspectos que constituyen el núcleo de la presente investigación.

En términos de gestión de proyectos, la falta de ambición estratégica limita la adopción de enfoques modernos de control basados en datos, automatización y análisis predictivo, perpetuando modelos tradicionales que han demostrado ser insuficientes para enfrentar la complejidad de los proyectos de infraestructura vial en Colombia. Asimismo, esta debilidad estratégica se articula con los hallazgos de tablas anteriores, donde se evidencian limitaciones en capacidades tecnológicas, talento humano y adopción de sistemas inteligentes, configurando un problema sistémico de baja madurez digital.

En conclusión, la tabla evidencia que la transformación hacia la Industria 4.0 no es aún una prioridad estratégica para la mayoría de las organizaciones del sector, lo que representa una de las principales barreras para la implementación efectiva de soluciones basadas en IA, ciencia de datos y BIM. Este hallazgo refuerza la necesidad, planteada en la investigación, de diseñar estrategias integrales que no solo aborden aspectos tecnológicos, sino que promuevan una alineación estratégica desde la alta dirección, condición indispensable para lograr una

transformación digital sostenible y con impacto real en el control de proyectos de infraestructura vial.

Tabla 23 Nivel de importancia asignado a las tecnologías emergentes en la organización

Preguntas	*Sin importancia*	*Importancia baja*	*Importancia media*	*Importancia alta*	*Importancia muy alta*	*Columnas*
Inteligencia artificial	11.10 %	23.60 %	23.60 %	29.20 %	12.50 %	
Fabricación aditiva	26.40 %	27.80 %	30.60 %	11.10 %	4.20 %	
Internet de las cosas	9.70 %	23.60 %	26.40 %	23.60 %	16.70 %	
Big data y análisis de datos	11.10 %	15.30 %	30.60 %	25.00 %	18.10 %	
Realidad virtual y aumentada	22.20 %	18.10 %	22.20 %	27.80 %	9.70 %	
Plataformas y comunicaciones	6.90 %	15.30 %	31.90 %	31.90 %	13.90 %	
Tecnologías en la nube (Cloud)	5.60 %	15.30 %	18.10 %	33.30 %	27.80 %	
Ciberseguridad	9.70 %	20.80 %	16.70 %	30.60 %	22.20 %	
Marketing digital	14.10 %	18.30 %	26.80 %	16.90 %	23.90 %	
Formación y personas	9.70 %	12.50 %	22.20 %	29.20 %	26.40 %	
Robótica y automatización	22.20 %	22.20 %	20.80 %	20.80 %	13.90 %	

Esta tabla constituye uno de los cierres más importantes del conjunto de resultados, ya que permite contrastar la percepción de importancia que los encuestados asignan a diversas tecnologías emergentes con los niveles reales de adopción documentados en tablas anteriores, revelando una brecha significativa entre el reconocimiento teórico y la implementación práctica.

Las tecnologías en la nube registran el mejor desempeño de toda la tabla, con el 61.10 % entre importancia alta y muy alta, lo que es coherente con los altos niveles de adopción de servicios en la nube identificados en la Tabla 11. Esta consistencia entre percepción e implementación sugiere que la nube es la tecnología donde la madurez digital del sector es más equilibrada y consolidada.

La ciberseguridad ocupa el segundo lugar en importancia percibida, con el 52.80 % entre alta y muy alta importancia. Este resultado contrasta notablemente con las debilidades en seguridad de la información documentadas en la Tabla 14, donde las prácticas formales de auditoría y respuesta ante incidentes eran deficientes. Esta brecha entre la importancia

reconocida y las prácticas reales sugiere que las organizaciones son conscientes de su vulnerabilidad pero no han traducido esa conciencia en acciones concretas.

La formación y personas registra el 55.50 % entre importancia alta y muy alta, siendo uno de los ítems mejor valorados de la tabla. Este resultado es especialmente significativo porque valida uno de los hallazgos centrales de esta investigación: los propios encuestados reconocen que el talento humano es un factor crítico para la transformación digital, lo que es consistente con los déficits de roles especializados identificados en la Tabla 16.

Las plataformas y comunicaciones muestran el 45.80 % entre importancia alta y muy alta, reflejando una valoración moderadamente positiva hacia las herramientas de conectividad e integración, aunque sin alcanzar los niveles más altos de la tabla.

En cuanto a las tecnologías directamente relacionadas con los objetivos de esta investigación, los resultados son reveladores. La inteligencia artificial registra el 41.70 % entre importancia alta y muy alta, pero también el 34.70 % entre sin importancia e importancia baja, lo que indica una percepción polarizada en el sector. Esta división refleja que mientras una parte del sector reconoce el potencial transformador de la IA, otra parte significativa aún no la considera relevante para su actividad, lo que representa un obstáculo cultural importante para su adopción.

El Big Data y análisis de datos muestra el 43.00 % entre importancia alta y muy alta, con un comportamiento similar a la IA, confirmando que las tecnologías de gestión y análisis de datos tienen una valoración moderada pero con resistencias importantes en una fracción relevante del sector.

La robótica y automatización y la realidad virtual y aumentada presentan distribuciones más equilibradas entre todos los niveles, con porcentajes entre importancia alta y muy alta del 34.70 % y 37.50 % respectivamente, lo que indica que estas tecnologías son percibidas como menos prioritarias para el sector en el corto plazo.

El caso más llamativo es el Internet de las cosas (IoT), que registra el 40.70 % entre importancia alta y muy alta, pero también el 33.40 % entre sin importancia e importancia baja. Considerando que el IoT es precisamente la tecnología habilitadora de los sistemas de monitoreo en tiempo real y la comunicación M2M identificada como prácticamente ausente en la Tabla 7, esta percepción dividida explica en parte por qué su adopción sigue siendo tan limitada en el sector.

En síntesis, los resultados de esta tabla revelan que el sector asigna mayor importancia a tecnologías de soporte e infraestructura como la nube, la ciberseguridad y la formación, mientras que las tecnologías con mayor potencial transformador para el control de proyectos viales como la IA, el Big Data y el IoT reciben valoraciones más moderadas y polarizadas. Esta jerarquía de importancia percibida, que no siempre coincide con las necesidades estratégicas del sector, deberá ser considerada en el diseño de las estrategias de implementación propuestas en esta investigación, contemplando acciones específicas de sensibilización y formación que permitan alinear la percepción del sector con el potencial real de estas tecnologías para transformar el control de la infraestructura vial en Colombia.

5.2 Propuesta al sector

5.2.1 Introducción a la propuesta

La presente propuesta estratégica constituye el producto central de esta investigación y da respuesta directa al tercer objetivo específico: diseñar una propuesta estratégica para la implementación gradual de tecnologías de inteligencia artificial (IA), ciencia de datos y la metodología BIM que fortalezcan la eficiencia, transparencia y sostenibilidad de los proyectos de infraestructura vial en Colombia.

Su formulación se sustenta en tres pilares interrelacionados: (i) el diagnóstico de las limitaciones estructurales identificadas en el control de los proyectos viales colombianos, abordadas en el primer objetivo específico; (ii) el estado del arte de la aplicación de estas tecnologías a nivel internacional, nacional y local, analizado en el segundo objetivo; y (iii) la evidencia empírica derivada de los resultados de la encuesta de madurez tecnológica aplicada a 73 organizaciones del sector de la construcción en Colombia.

Esta convergencia de evidencia teórica y empírica permite que la propuesta no sea un conjunto de recomendaciones genéricas, sino una hoja de ruta fundamentada, contextualizada y viable para el sistema de infraestructura vial colombiano. La propuesta reconoce que la transformación digital no es un evento puntual sino un proceso gradual que requiere condiciones habilitadoras en múltiples dimensiones: tecnológica, organizacional, normativa, financiera y de talento humano.

El sector vial colombiano invierte cerca del 3,5 % del PIB anual en construcción y mantenimiento de carreteras (Ministerio de Transporte, 2023), y sin embargo enfrenta desafíos estructurales persistentes que se traducen en más de 1.647 alertas de posibles irregularidades por valor de 71,8 billones de pesos, según la Contraloría General de la República (Revista Semana, 2024). Esta paradoja entre inversión y resultado es precisamente el problema que la presente propuesta busca contribuir a resolver, mediante la adopción inteligente, gradual e institucionalizada de herramientas tecnológicas de probada eficacia a nivel internacional.

La propuesta se estructura en cuatro componentes articulados: un diagnóstico base que sintetiza los hallazgos críticos, tres ejes estratégicos de implementación, una ruta de implementación gradual organizada en fases, y un conjunto de recomendaciones institucionales dirigidas a los actores clave del ecosistema vial colombiano.

5.2.2 Diagnóstico base: síntesis de hallazgos

El diagnóstico base articula los hallazgos provenientes de dos fuentes complementarias: la revisión sistemática de literatura y los resultados cuantitativos de la encuesta de madurez tecnológica. Su propósito es establecer el punto de partida real sobre el cual debe operar la propuesta estratégica, evitando que esta se sustente en supuestos idealistas desconectados de la realidad del sector.

5.2.3 Hallazgos desde la revisión de literatura

La revisión sistemática de literatura realizada sobre la base de datos Scopus para el período 2016-2025 confirma cuatro grandes limitaciones estructurales en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia, que se corresponden con las identificadas en el primer objetivo específico de la investigación:

a) Limitaciones técnicas: La capacidad técnica de las entidades encargadas de interventoría y control es insuficiente para garantizar la supervisión efectiva de materiales, ejecución y adherencia a normas contractuales (Peñaranda Pabón & Ravelo Pérez, 2021). La ausencia de herramientas de inspección avanzadas y la limitada capacidad de laboratorio generan brechas en los procesos de supervisión operativa.

b) Limitaciones administrativas: La dispersión de entidades con funciones similares, la falta de coordinación interinstitucional y los procedimientos duplicados o contradictorios ralentizan las decisiones y abren espacios para prácticas irregulares (Serna et al., 2018). El caso de la concesión Ruta del Sol II ilustra con claridad cómo la ausencia de metodologías de control sólidas puede desencadenar consecuencias económicas, legales y sociales de gran magnitud (León Gutiérrez, 2021).

c) Limitaciones de información: Sin sistemas integrados que permitan recopilar, centralizar y actualizar datos en tiempo real, los informes de seguimiento llegan con retraso, presentan brechas de contenido o no reflejan la realidad del proyecto, lo que impide anticipar riesgos y reaccionar oportunamente ante imprevistos (Sarmiento Rojas et al., 2023).

d) Limitaciones de capacidad tecnológica y cultural: Existe una brecha notable en la formación de los profesionales del sector frente a metodologías modernas como BIM, IA y ciencia de datos, combinada con una cultura institucional que tiende a apegarse a prácticas tradicionales, lo cual perpetúa ineficiencias (Khan et al., 2024).

A nivel internacional, la evidencia disponible es contundente: la CEPAL (2024) señala que la brecha digital en infraestructura pública genera ineficiencias superiores al 20 % en ejecución presupuestal; los sistemas de análisis predictivo pueden reducir hasta un 25 % los sobrecostos y mejorar en un 30 % el cumplimiento de cronogramas (Attia, 2025); y la experiencia de países como Finlandia, Corea del Sur y los miembros de la Unión Europea muestra que el uso combinado de BIM e IA no reemplaza al profesional sino que amplía su capacidad de decisión (Rinchen et al., 2024).

5.2.4 Hallazgos desde la encuesta de madurez tecnológica

Los resultados de la encuesta aplicada a 73 organizaciones del sector de la construcción en Colombia revelan un panorama de madurez tecnológica baja e inconsistente, que puede sintetizarse en cinco hallazgos críticos:

1. Adopción tecnológica mínima en IA, BIM e IoT: Los datos muestran niveles de adopción del 4 % para IA, 1 % para BIM y 5,5 % para comunicación M2M (Machine to Machine). Estos porcentajes son alarmantes considerando que estas tecnologías son precisamente las que la evidencia internacional identifica como más transformadoras para el control de proyectos viales.

2. Digitalización parcial e inconsistente: El 47,9 % de las organizaciones utiliza un modelo híbrido de registros (papel y digital), el 15,1 % no registra información de ninguna manera, y solo el 31,5 % tiene todos sus procesos completamente digitalizados. Esta fragmentación documental impide la trazabilidad completa y la integración de datos en plataformas de gestión centralizada.

3. Infraestructura de nube subutilizada: Aunque el 69,9 % utiliza software y almacenamiento en la nube, solo el 46,6 % la emplea para evaluación y análisis de datos. Esta paradoja revela que el sector ha adoptado la nube como repositorio pero no como infraestructura de inteligencia analítica, que es su dimensión más valiosa para el control predictivo de proyectos.

4. Déficit estructural de talento especializado: El 42,5 % de las organizaciones no tiene ningún rol especializado en transformación digital, y solo el 1,4 % cuenta con una estructura de gran especialización. Simultáneamente, en la dimensión de análisis de datos, el 51,4 % del talento humano se autoevalúa como capacitado pero insuficientemente, y el 22,2 % declara no tener formación alguna en esta área.

5. Ausencia de visión estratégica hacia la Industria 4.0: El 49,3 % de las organizaciones no ha considerado el paso hacia la Industria 4.0 ni contempla sus beneficios, y apenas el 2,8 % ha iniciado procesos concretos de implementación. Esta brecha entre conciencia estratégica y ejecución constituye uno de los obstáculos culturales e institucionales más profundos para la transformación digital del sector.

En conjunto, estos hallazgos configuran un diagnóstico que puede resumirse en una premisa fundamental: el sector de infraestructura vial en Colombia no carece únicamente de tecnología, sino de las condiciones habilitadoras —organizacionales, de talento humano, de

infraestructura digital y de visión estratégica— para adoptarla, gestionarla y sostenerla en el tiempo. Esta premisa orienta la arquitectura de la propuesta estratégica que se presenta a continuación

5.2.5 Ejes estratégicos de implementación

La propuesta se articula en tres ejes estratégicos complementarios e interdependientes, diseñados para abordar de manera integral las dimensiones identificadas en el diagnóstico. Cada eje incorpora componentes tecnológicos, organizacionales y de gobernanza, reconociendo que la transformación digital efectiva requiere intervenciones simultáneas en múltiples frentes.

5.2.5.1 Eje 1: Digitalización e integración de la información para el control de proyectos

Este eje responde directamente al hallazgo crítico de la fragmentación documental y la ausencia de sistemas integrados de información identificada tanto en la literatura como en los resultados empíricos. Su propósito es construir la base digital sin la cual las tecnologías más avanzadas como la IA no tienen datos suficientes para operar de manera efectiva.

Componente 1.1 – Estandarización y digitalización completa del registro de información

El 68,5 % del sector no cuenta con digitalización completa de sus registros de proceso. La primera acción estratégica consiste en establecer protocolos estandarizados de registro digital para todas las etapas del ciclo de vida del proyecto vial: diseño, preconstrucción, ejecución, supervisión técnica, seguimiento financiero y cierre. Estos protocolos deben ser obligatorios para

entidades contratantes y contratistas, y deben definir formatos interoperables que permitan el intercambio de información entre actores.

Esta estandarización debe apoyarse en el marco normativo existente, particularmente en el Plan Maestro de Transporte Intermodal 2021-2035 (DNP, 2021), que promueve el uso de plataformas tecnológicas para monitoreo en tiempo real, y en la Ley 1682 de 2013, que establece principios de innovación tecnológica en la gestión del transporte.

Componente 1.2 – Implementación de plataformas integradas de gestión de proyectos (PMP)

Se propone la adopción de Plataformas de Gestión de Proyectos (PMP) que integren en un único entorno digital las variables técnicas, financieras, contractuales y de cronograma de cada proyecto. Estas plataformas deben garantizar: (i) actualización en tiempo real del avance físico vs. financiero, eliminando las brechas de información que impiden detectar fallas tempranas; (ii) trazabilidad completa de las decisiones técnicas y administrativas, fortaleciendo la transparencia y la rendición de cuentas; y (iii) interoperabilidad con los sistemas de información de las entidades de control como la Contraloría General y el INVÍAS, facilitando el monitoreo institucional.

La experiencia documentada por Sarmiento Rojas et al. (2023) en Colombia y por Basnyat y Joshi (2020) en Nepal demuestra que los tableros de control comparativos y las plataformas georreferenciadas reducen desviaciones superiores al 15 % en cronogramas contractuales, lo que justifica la inversión requerida por estas herramientas.

Componente 1.3 – Aprovechamiento estratégico de la infraestructura de nube existente

El dato de que el 69,9 % del sector ya utiliza servicios de nube para almacenamiento y software, pero solo el 46,6 % la emplea para análisis de datos, revela una oportunidad inmediata de alto impacto con baja inversión marginal. Se propone un programa de activación del potencial analítico de la nube ya disponible, mediante la implementación de herramientas de business intelligence y visualización de datos (como Power BI o Tableau) conectadas a las bases de datos de proyectos, que permitan generar dashboards de seguimiento en tiempo real accesibles para interventores, supervisores y entidades de control. Esta acción puede implementarse en el corto plazo sobre la infraestructura tecnológica ya existente, sin requerir nuevas inversiones de capital significativas.

5.2.5.2 Eje 2: Implementación de inteligencia artificial, ciencia de datos y BIM para el control predictivo

Este eje constituye el núcleo tecnológico de la propuesta y materializa el objetivo de transitar desde un modelo de control reactivo hacia un sistema preventivo, transparente y sustentado en información verificable. Se articula en tres sub-componentes que avanzan progresivamente en complejidad tecnológica, reconociendo los bajos niveles de adopción actuales documentados en el diagnóstico.

Componente 2.1 – Implementación de la metodología BIM en proyectos de infraestructura vial

La metodología Building Information Modeling (BIM) es la herramienta de mayor impacto documentado para el control integral de proyectos viales. El estudio de Hinostroza et al. (2021) en Perú demostró reducciones del 10,71 % en tiempo y mejoras en eficiencia presupuestal

mediante su implementación, mientras que Samuelson y Stehn (2023) evidencian que BIM puede reducir conflictos en obra hasta en un 35 %. La revisión sistemática de Herrera et al. (2024) identificó 39 aplicaciones y 26 tecnologías complementarias (GIS, escaneo láser, realidad aumentada) integradas con BIM en proyectos viales.

La propuesta contempla la adopción progresiva de BIM comenzando con los niveles de madurez más básicos (BIM Level 1: modelado 3D) y avanzando hacia la integración multidimensional (BIM 4D para cronograma y BIM 5D para costos). Para el contexto colombiano, se recomienda seguir los lineamientos desarrollados por Afranio y Andrés (2021) y Jezreel Fonseca et al. (2024), quienes formularon guías específicas para la implementación de BIM en condiciones de proyectos de infraestructura vial en Colombia, adaptadas a las particularidades institucionales y contractuales del país.

La implementación de BIM debe ir acompañada obligatoriamente de un programa de formación específico para equipos de interventoría, dado que la metodología requiere no solo software sino competencias de trabajo colaborativo en entornos digitales, cuyo déficit fue confirmado por el 48,6 % de encuestados que reportó capacitación insuficiente en software de colaboración.

Componente 2.2 – Aplicación de ciencia de datos para el análisis predictivo del desempeño de proyectos

La ciencia de datos ofrece la capacidad de transformar los grandes volúmenes de información generados en la ejecución de obras en conocimiento accionable para la toma de decisiones. Su implementación en el control de proyectos viales colombianos debe seguir tres líneas de acción articuladas:

- Construcción de bases de datos históricas integradas: A partir de la digitalización completa de los registros de proyectos ejecutados entre 2018 y 2025, se debe construir una base de datos estructurada que incluya variables de costo, tiempo, calidad, condiciones climáticas, características geográficas y factores de riesgo. Esta base de datos constituirá el insumo fundamental para el entrenamiento de modelos predictivos.
- Desarrollo de modelos predictivos de desviación de costo y tiempo: Mediante técnicas de aprendizaje automático (regresión, árboles de decisión, redes neuronales), se pueden desarrollar modelos que anticipen la probabilidad de sobrecosto o retraso en función de las características del proyecto y su comportamiento histórico. La experiencia de Gómez Cabrera et al. (2025) en proyectos de infraestructura educativa colombiana, aplicando modelos de analítica de datos para generar alertas tempranas sobre desviaciones, demuestra la viabilidad de esta aproximación en el contexto nacional.
- Implementación de sistemas de alerta temprana: Los modelos predictivos deben alimentar sistemas de alerta que notifiquen a los supervisores e interventores cuando un proyecto presente indicios de desviación, permitiendo la adopción de medidas correctivas antes de que los problemas escalen. Flores y Ascaño (2025) documentan que estos sistemas mejoran significativamente la capacidad predictiva en proyectos de construcción, pasando de un enfoque reactivo a uno proactivo.

Componente 2.3 – Incorporación de inteligencia artificial para la automatización del control de calidad y riesgos

La inteligencia artificial complementa a la ciencia de datos al permitir el procesamiento de tipos de información más complejos (imágenes, datos de sensores, documentos contractuales)

y la automatización de procesos de control que actualmente requieren intervención humana intensiva. En el contexto de la infraestructura vial colombiana, su aplicación se propone en tres áreas específicas de alto impacto:

- Control de calidad mediante visión computacional: El uso de cámaras y algoritmos de visión por computadora permite automatizar la verificación de la calidad de materiales y la ejecución conforme a especificaciones en campo, reduciendo la dependencia de inspecciones manuales que actualmente presentan limitaciones de cobertura y oportunidad. Zhang (2023) documenta cómo los algoritmos de aprendizaje automático integrados con sensores lograron automatizar el control de calidad en subrasantes y reducir errores constructivos.
- Detección de anomalías y riesgos en documentación contractual: Los modelos de procesamiento de lenguaje natural (NLP) pueden analizar grandes volúmenes de documentos contractuales, informes de interventoría y registros de avance para identificar inconsistencias, omisiones o indicadores de riesgo que podrían pasar desapercibidos en revisiones manuales, fortaleciendo la transparencia y el control institucional.
- Integración de IoT para monitoreo estructural preventivo: La incorporación de sensores IoT en puntos críticos de las obras permite el monitoreo estructural en tiempo real y la identificación temprana de fallas potenciales. Kussl y Wald (2023) documentan que estas tecnologías transforman la supervisión tradicional hacia esquemas predictivos de mantenimiento preventivo. Dado el actual 5,5 % de adopción de comunicación M2M identificado en los resultados, esta componente debe implementarse de manera gradual, comenzando con proyectos piloto en corredores de alta criticidad.

5.2.5.3 Eje 3: Fortalecimiento de capacidades institucionales y del talento humano

El tercer eje reconoce que la tecnología por sí sola no es suficiente para transformar el control de proyectos viales. El diagnóstico evidenció que el 65,8 % de las organizaciones no cuenta con departamento de TI propio, el 42,5 % carece de roles especializados en transformación digital, y el 49,3 % no contempla la transición hacia la Industria 4.0. Sin atender estas condiciones organizacionales e institucionales, cualquier inversión en herramientas tecnológicas avanzadas resultará en iniciativas parciales, discontinuas y de impacto limitado.

Componente 3.1 – Programa de desarrollo de talento humano en competencias digitales para el sector vial

Se propone el diseño e implementación de un Programa Nacional de Formación en Tecnologías para la Gestión de Infraestructura Vial, articulado entre el Ministerio de Transporte, el INVÍAS, la ANI, el SENA y las universidades con programas de ingeniería civil y afines. Este programa debe contemplar tres niveles de formación:

- Nivel básico – Alfabetización digital: Dirigido al 27,8 % del talento humano sin capacitación en automatización y al 22,2 % sin formación en análisis de datos. Cubre competencias fundamentales en manejo de plataformas de gestión de proyectos, registro digital de información y uso de herramientas de visualización.
- Nivel intermedio – Especialización técnica: Dirigido a profesionales de interventoría y supervisión. Cubre la metodología BIM (niveles 1 y 2), análisis básico de datos con herramientas de business intelligence, interpretación de modelos predictivos y gestión de sistemas de alerta temprana.

- Nivel avanzado – Liderazgo en transformación digital: Dirigido a directores técnicos, jefes de interventoría y funcionarios de entidades contratantes. Cubre estrategia de implementación de IA, gobierno de datos, gestión del cambio organizacional y evaluación de proyectos de transformación digital.

Este programa responde al hallazgo de que el 55,5 % de los encuestados reconoce la formación y el talento humano como un factor de importancia alta o muy alta para la transformación digital, lo que indica una disposición favorable del sector hacia la capacitación que debe aprovecharse estratégicamente.

Componente 3.2 – Fortalecimiento de las capacidades internas de gestión tecnológica en las organizaciones

El 65,8 % de organizaciones sin departamento de TI propio revela que la gestión tecnológica del sector está externalizada y, por tanto, es frágil y poco adaptable. Se propone un modelo escalonado de fortalecimiento interno:

- Para organizaciones pequeñas y medianas: Designación de un líder de transformación digital interno (aunque sea en modalidad de responsabilidad compartida), que sea el punto focal para la implementación y seguimiento de las iniciativas tecnológicas. Este rol puede ser ejercido por un profesional de ingeniería con formación complementaria en gestión digital.
- Para organizaciones medianas y grandes: Creación de una unidad de innovación y tecnología que integre profesionales de ingeniería civil, ciencia de datos y TI, con mandato específico de liderar la adopción de BIM, IA y herramientas de análisis en los proyectos de la organización.

- Para entidades públicas (INVÍAS, ANI, Gobernaciones): Establecimiento de Oficinas de Gestión de Datos (OGD) con capacidad de centralizar, procesar y analizar la información de todos los proyectos bajo su jurisdicción, generando inteligencia institucional sobre el comportamiento del portafolio de obras.

Componente 3.3 – Gestión del cambio y cultura de innovación en el sector

El 49,3 % de organizaciones que no contempla el paso hacia la Industria 4.0 señala un desafío de cultura organizacional que debe abordarse con igual rigor que los desafíos técnicos. La gestión del cambio debe incluir: (i) campañas de sensibilización sobre el impacto concreto de las tecnologías en la eficiencia y los resultados de los proyectos, usando casos de éxito documentados a nivel nacional e internacional; (ii) creación de comunidades de práctica intersectoriales que faciliten el intercambio de experiencias entre organizaciones en distintas etapas de madurez digital; y (iii) incorporación de indicadores de transformación digital en los modelos de evaluación y calificación de contratistas e interventoras, generando incentivos de mercado para la adopción tecnológica.

5.2.6 Ruta de implementación gradual

La evidencia empírica obtenida en esta investigación demuestra que el sector se encuentra en una etapa temprana de madurez digital, lo que hace inviable una implementación simultánea e integral de todas las tecnologías propuestas. La ruta de implementación gradual que se presenta a continuación responde a esta realidad, organizando las intervenciones en tres fases temporales que avanzan progresivamente en complejidad y que construyen sobre los logros de la fase anterior.

Esta ruta es coherente con los principios de gradualidad y viabilidad que caracteriza a las implementaciones exitosas de tecnología en el sector público, y se alinea con las experiencias documentadas en países latinoamericanos con contextos similares al colombiano (Afranio & Andrés, 2021; Rinchen et al., 2024).

La conveniencia de estructurar esta transformación mediante una ruta progresiva encuentra respaldo adicional en Jaimes-Quintanilla et al. (2026), quienes plantean que la integración de inteligencia artificial, ciencia de datos, IoT y BIM debe responder al nivel de madurez tecnológica de las organizaciones y desarrollarse mediante etapas de adopción claramente definidas. Como resultado de la validación de su framework, los autores recomiendan complementar las rutas de implementación con indicadores clave de desempeño y criterios de evaluación del retorno de la inversión. En consecuencia, la secuencia propuesta en esta investigación (cimentación digital, integración tecnológica y consolidación) permite avanzar progresivamente desde capacidades básicas de información hacia modelos predictivos e integrados de mayor complejidad

FASE	PERÍODO Y DENOMINACIÓN	OBJETIVOS PRINCIPALES
Fase I	Corto plazo (0–12 meses): Cimentación digital	Estandarizar registros digitales. Activar infraestructura de nube para análisis. Iniciar formación básica. Implementar dashboards de seguimiento.
Fase II	Mediano plazo (13–30 meses): Integración tecnológica	Implementar BIM Nivel 1 y 2. Desarrollar modelos predictivos. Establecer sistemas de alerta temprana. Fortalecer roles internos de TI.
Fase III	Largo plazo (31–60 meses): Consolidación e innovación	Escalar IA y BIM 5D al portafolio completo. Integrar IoT para monitoreo estructural. Consolidar Oficinas de Gestión de Datos. Establecer política nacional de transformación digital vial.

5.2.6.1 Fase I: Cimentación digital (0–12 meses)

La Fase I tiene como propósito construir las condiciones habilitadoras básicas sin las cuales las tecnologías más avanzadas no pueden operar efectivamente. Se concentra en tres frentes de acción simultáneos:

Frente 1 – Digitalización y estandarización documental:

Diseño e implementación de protocolos estandarizados de registro digital para los principales procesos de control de obras (avance físico, ejecución presupuestal, calidad de materiales, cumplimiento contractual). Migración de los registros en papel al formato digital en el 100 % de los proyectos nuevos que se adjudiquen durante el período. Implementación de formularios digitales accesibles desde dispositivos móviles para el reporte en campo, reconociendo las condiciones de conectividad variable en zonas rurales donde se ejecutan gran parte de las obras viales.

Frente 2 – Activación del potencial analítico de la nube:

Aprovechando que el 69,9 % del sector ya cuenta con infraestructura de nube, se propone la implementación de herramientas de visualización y business intelligence (Power BI, Google Looker Studio u equivalentes de código abierto) conectadas a las bases de datos de proyectos existentes. El objetivo es que al finalizar la Fase I, cada proyecto cuente con un dashboard de seguimiento en tiempo real que muestre las variables clave de desempeño (avance físico vs. financiero, cumplimiento de hitos críticos, alertas de desviación) y que sea accesible para interventores, supervisores y entidades de control.

Frente 3 – Formación básica y sensibilización:

Lanzamiento del nivel básico del Programa Nacional de Formación en Tecnologías para la Gestión de Infraestructura Vial, en alianza con el SENA y universidades regionales. Inicio de campañas de sensibilización sobre el impacto de las tecnologías en la eficiencia de los proyectos, dirigidas a la alta dirección de las organizaciones del sector para generar el alineamiento estratégico identificado como ausente en el 49,3 % de los encuestados.

Indicadores de éxito de la Fase I: 100 % de proyectos nuevos con registro digital completo; 80 % de proyectos activos con dashboard de seguimiento implementado; 500 profesionales del sector formados en el nivel básico de competencias digitales; al menos 10 organizaciones con un líder de transformación digital designado.

5.2.6.2 Fase II: Integración tecnológica (13–30 meses)

La Fase II escala la complejidad tecnológica sobre la base digital construida en la Fase I. Su propósito central es la implementación de las tres tecnologías nucleares de la propuesta (BIM, ciencia de datos e IA en nivel básico) en un conjunto representativo de proyectos piloto que permita validar los modelos, ajustar los procesos y generar evidencia nacional sobre el impacto de estas herramientas.

Proyectos piloto de BIM:

Selección de entre 5 y 10 proyectos de infraestructura vial de mediana complejidad, preferiblemente en las regiones de Risaralda, Caldas, Putumayo y Huila identificadas en esta investigación, para la implementación de BIM Nivel 1 (modelado 3D) y BIM Nivel 2 (modelos colaborativos con información técnica integrada). Estos pilotos servirán como laboratorios de aprendizaje y generarán los casos de estudio que alimentarán la escalación en la Fase III.

Desarrollo de modelos predictivos:

Con la base de datos histórica construida en la Fase I, se desarrollan los primeros modelos de ciencia de datos para la predicción de desviaciones de costo y tiempo. Estos modelos deben ser validados con datos de proyectos reales y ajustados iterativamente antes de su implementación operativa. Se recomienda la colaboración con universidades con programas de ciencia de datos (Universidad de los Andes, Universidad Nacional, entre otras) para el desarrollo y validación técnica de estos modelos.

Sistemas de alerta temprana:

Integración de los modelos predictivos con las plataformas de gestión de proyectos implementadas en la Fase I, de manera que los dashboards de seguimiento incorporen indicadores de alerta que notifiquen automáticamente a los actores relevantes cuando se detecten señales de desviación. El objetivo es que al finalizar la Fase II, al menos el 30 % de los proyectos activos cuente con sistemas de alerta temprana operativos.

Indicadores de éxito de la Fase II: Al menos 5 proyectos piloto con BIM Nivel 1 operativo; 2 modelos predictivos de desviación validados y en uso; 30 % de proyectos con alertas tempranas automáticas; 1.500 profesionales formados en nivel intermedio de competencias digitales; 50 % de organizaciones con roles especializados en transformación digital.

5.2.6.3 Fase III: Consolidación e innovación (31–60 meses)

La Fase III consolida los logros de las fases anteriores, escala las tecnologías implementadas en los proyectos piloto al portafolio completo de infraestructura vial, e introduce las aplicaciones tecnológicas de mayor complejidad y mayor impacto potencial.

Escalación de BIM al portafolio completo y adopción de BIM 5D:

Con base en las lecciones aprendidas de los pilotos de la Fase II, se escala la implementación de BIM a todos los proyectos de infraestructura vial de mediana y gran escala, avanzando hacia BIM 5D que integra el modelo tridimensional con la programación (4D) y los costos (5D). Esta dimensión de BIM permite la simulación completa del proyecto antes de su ejecución, identificando interferencias, optimizando cronogramas y controlando presupuestos con una precisión que los métodos tradicionales no pueden alcanzar.

Integración de IoT y visión computacional para monitoreo en campo:

Implementación de sensores IoT en corredores viales de alta criticidad para el monitoreo estructural en tiempo real, y desarrollo de sistemas de visión computacional para la verificación automatizada de calidad en campo. Estas tecnologías, aunque representan la inversión más significativa de la propuesta, generan los mayores beneficios en términos de reducción de fallas estructurales y costos de mantenimiento correctivo.

Consolidación de Oficinas de Gestión de Datos en entidades públicas:

Establecimiento formal de las Oficinas de Gestión de Datos (OGD) en el INVÍAS, la ANI y las gobernaciones de los departamentos con mayor volumen de inversión vial. Estas oficinas deben contar con equipos multidisciplinarios de ingenieros civiles, científicos de datos y profesionales de TI, con mandato explícito de centralizar, analizar y publicar datos sobre el desempeño del portafolio de proyectos viales, contribuyendo a la transparencia y la rendición de cuentas ante la ciudadanía.

Indicadores de éxito de la Fase III: 100 % de proyectos de mediana y gran escala con BIM operativo; al menos 20 corredores críticos con monitoreo IoT; reducción demostrable del 15 % en sobrecostos promedio respecto a la línea base del período 2020-2024; reducción del 20 % en tiempo de detección y respuesta ante desviaciones; política nacional de transformación digital vial aprobada y en implementación.

6 Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten contrastar, desde una perspectiva empírica y contextualizada, el potencial transformador que la literatura especializada atribuye a la inteligencia artificial (IA), la ciencia de datos y la metodología BIM con la realidad concreta del sector de infraestructura vial en Colombia. Esta contrastación revela una brecha significativa entre el reconocimiento teórico de estas tecnologías y su efectiva incorporación en los procesos de control de proyectos, lo cual constituye el hallazgo central de la presente discusión.

Desde la revisión de literatura, autores como Attia (2025) y Flores y Ascaño (2025) documentan que los sistemas de análisis predictivo basados en IA pueden reducir hasta un 25 % los sobrecostos asociados a la mala planificación y mejorar en un 30 % el cumplimiento de los cronogramas. Investigaciones como las de Hinostroza et al. (2021) demuestran reducciones del 10,71 % en tiempos de ejecución mediante la implementación de BIM en proyectos viales, mientras que Samuelson y Stehn (2023) evidencian disminuciones de hasta el 35 % en conflictos durante la obra cuando se emplea esta metodología de manera integral. Sin embargo, los resultados empíricos de esta investigación revelan que tales beneficios permanecen mayoritariamente fuera del alcance del sector colombiano, donde la adopción de IA se sitúa en apenas un 4 %, la de BIM en un 1 % y la comunicación M2M en un 5,5 % de las organizaciones encuestadas. Este contraste entre el potencial documentado y la realidad medida configura una paradoja que requiere análisis profundo.

Esta brecha coincide con evidencia reciente obtenida directamente en el sector constructor colombiano. Zabala-Vargas y Jaimes-Quintanilla (2026), mediante la evaluación de 55 organizaciones vinculadas con construcción e ingeniería civil, identificaron una madurez tecnológica promedio de 2,8 sobre 5, caracterizada como baja a moderada, con debilidades particularmente relevantes en las dimensiones estratégica y de gobernanza. Los autores sostienen que la incorporación efectiva de inteligencia artificial, ciencia de datos e IoT requiere articular la tecnología con planificación, gestión de riesgos, capacidades organizacionales y estructuras de gobernanza. La convergencia entre ambos estudios permite señalar que las limitaciones encontradas en el presente trabajo no constituyen únicamente casos aislados de baja adopción, sino manifestaciones de una brecha de madurez digital más amplia dentro del sector colombiano.

Una primera explicación de esta paradoja reside en las barreras estructurales que el diagnóstico identificó en cuatro dimensiones interrelacionadas: técnica, administrativa, informacional y cultural. En el plano técnico, Peñaranda Pabón y Ravelo Pérez (2021) ya habían señalado que la capacidad técnica de las entidades de interventoría es insuficiente para adoptar herramientas avanzadas de supervisión, hallazgo que esta investigación confirma al registrar que el 65,8 % de las organizaciones carece de departamento de TI propio y que el 42,5 % no tiene ningún rol especializado en transformación digital. En el plano cultural, el dato más revelador es que el 49,3 % de las organizaciones no ha considerado siquiera la transición hacia la Industria 4.0, lo que evidencia que el problema no es únicamente de recursos sino de visión estratégica, en línea con lo planteado por Afranio y Andrés (2021), quienes argumentan que la transformación digital en América Latina requiere rediseñar procesos y fortalecer competencias antes de invertir en tecnología.

Un segundo elemento de discusión se relaciona con la fragmentación de la información. Sarmiento Rojas et al. (2023) identificaron que la dispersión de bases de datos entre entidades públicas impide consolidar información confiable sobre el avance físico y financiero de los proyectos. Los resultados de la encuesta confirman esta situación: el 47,9 % de las organizaciones utiliza modelos híbridos de registro (papel y digital) y el 15,1 % no registra información de forma sistemática. Esta fragmentación no solo limita la trazabilidad de las decisiones técnicas y administrativas, sino que imposibilita la construcción de las bases de datos históricas necesarias para entrenar modelos de inteligencia artificial con capacidad predictiva real. En este sentido, la baja adopción tecnológica no es únicamente consecuencia de resistencia al cambio, sino también de la ausencia de infraestructura informacional básica que haga viable la implementación de tecnologías más avanzadas.

Un tercer aspecto que merece discusión es la percepción polarizada sobre la importancia de las tecnologías clave. Los resultados muestran que la inteligencia artificial es considerada de alta o muy alta importancia por el 41,7 % de los encuestados, pero irrelevante o de baja importancia por el 34,7 %. Esta polarización refleja que, mientras una fracción del sector reconoce el potencial transformador de la IA, otra parte significativa aún no la percibe como una herramienta pertinente para su actividad cotidiana. Este hallazgo es coherente con lo documentado por Khan et al. (2024), quienes señalan que la brecha de formación frente a metodologías modernas como BIM e IA, combinada con una cultura institucional apegada a prácticas tradicionales, genera resistencias que van más allá de la disposición financiera y requieren intervenciones específicas de sensibilización y cambio organizacional.

Por otra parte, los resultados evidencian una paradoja particular en el uso de la infraestructura de nube: el 69,9 % del sector ya dispone de servicios en la nube para almacenamiento y software, pero solo el 46,6 % la emplea para evaluación y análisis de datos. Este hallazgo contrasta con el reconocimiento que el 61,1 % de los encuestados hace de las tecnologías en la nube como de alta o muy alta importancia, lo que sugiere que la brecha no es de conciencia sino de aplicación. Esta paradoja es especialmente relevante desde la perspectiva de la gestión de proyectos, ya que indica que el sector dispone de una infraestructura subutilizada cuya activación no requeriría inversiones de capital significativas, sino principalmente formación en el uso analítico de herramientas ya disponibles.

En síntesis, la discusión de resultados permite concluir que el problema del control deficiente de los proyectos de infraestructura vial en Colombia no es únicamente tecnológico. Es, ante todo, un problema sistémico que combina déficits de infraestructura informacional, escasez de talento especializado, ausencia de visión estratégica en la alta dirección y una cultura organizacional que aún no ha internalizado el valor de la transformación digital. La propuesta estratégica presentada en el capítulo anterior responde precisamente a esta complejidad al estructurarse en tres ejes interdependientes que abordan simultáneamente las dimensiones tecnológicas, organizacional y de talento humano. Su implementación exitosa requiere que los actores institucionales, privados y académicos del ecosistema vial colombiano actúen de manera coordinada y sostenida, superando la tentación de soluciones tecnológicas puntuales que, sin las condiciones habilitadoras adecuadas, están condenadas a tener impacto limitado y transitorio.

7 CONCLUSIÓN

En primer lugar, el diagnóstico del estado actual del control de proyectos de infraestructura vial en Colombia, realizado mediante la revisión sistemática de literatura para el período 2016–2025, permitió identificar cuatro limitaciones estructurales que se reproducen de manera consistente en la evidencia disponible: deficiencias técnicas en las entidades de interventoría, fragmentación administrativa entre organismos con funciones similares, ausencia de sistemas integrados de información en tiempo real, y una brecha tecnológica y cultural que perpetúa el apego a prácticas tradicionales de control. Estas limitaciones no son independientes entre sí, sino que se refuerzan mutuamente, configurando un problema sistémico que explica la persistencia de sobrecostos y retrasos documentados por la Contraloría General de la República en más de 1.647 alertas valoradas en 71,8 billones de pesos para el año 2024. Este diagnóstico confirma que los mecanismos tradicionales de supervisión resultan insuficientes para garantizar la eficiencia, la transparencia y la sostenibilidad de la inversión pública en infraestructura vial.

En segundo lugar, el estado de incorporación de tecnologías emergentes y el nivel de interés en su apropiación dentro del sector de infraestructura vial en Colombia reflejan una madurez digital incipiente, con avances fragmentados e inconsistentes. Los resultados de la encuesta aplicada a 73 organizaciones revelan cifras que evidencian una brecha crítica: adopción de IA en el 4 % de las organizaciones, de BIM en apenas el 1 %, y de comunicación M2M en el 5,5 %. Al mismo tiempo, el 49,3 % de las organizaciones no contempla la transición hacia la Industria 4.0, y el 42,5 % carece de roles especializados en transformación digital.

No obstante, la encuesta también revela señales positivas: el 55,5 % reconoce la formación y el talento humano como factores de alta importancia, y el 69,9 % ya utiliza servicios en la nube, aunque de manera subutilizada. Estas señales indican que existe una base sobre la cual construir procesos de transformación gradual, siempre que se intervenga de manera simultánea en las dimensiones tecnológica, organizacional y de desarrollo de capacidades.

En tercer lugar, la propuesta estratégica desarrollada en respuesta al tercer objetivo específico constituye una hoja de ruta fundamentada, contextualizada y gradual para la implementación de IA, ciencia de datos y BIM en el control de proyectos de infraestructura vial en Colombia. Estructurada en tres ejes interdependientes –digitalización e integración de la información, implementación tecnológica para el control predictivo, y fortalecimiento institucional y del talento humano– y organizada en tres fases temporales de implementación progresiva (cimentación digital, integración tecnológica y consolidación e innovación), la propuesta reconoce que la tecnología no puede ser el punto de partida cuando las condiciones habilitadoras básicas aún no están consolidadas. En este sentido, la contribución más relevante de esta investigación no radica únicamente en la identificación de las herramientas tecnológicas con mayor potencial para el sector, sino en la construcción de una ruta de implementación que considera las limitaciones reales del contexto colombiano y propone intervenciones viables, articuladas y sostenibles en el tiempo.

Finalmente, esta investigación pone de manifiesto que la transformación digital del control de proyectos viales en Colombia es una necesidad estratégica que trasciende el ámbito tecnológico. Requiere voluntad política de las entidades públicas para actualizar el marco normativo e institucional, capacidad de adaptación de las organizaciones privadas para invertir en talento y tecnología, y compromiso de las instituciones académicas para generar los profesionales que el sector necesita. Cuando estas condiciones confluyan, la adopción de herramientas como la IA, la ciencia de datos y BIM no solo mejorará la eficiencia del control de obras, sino que contribuirá a reducir la corrupción, fortalecer la transparencia y garantizar quecada peso de inversión pública en infraestructura vial se traduzca en un beneficio real y verificable para las comunidades colombianas.

8 RECOMENDACIONES

La viabilidad de la propuesta estratégica depende en última instancia de la voluntad y la capacidad de los actores institucionales para crear las condiciones normativas, financieras y operativas que hagan posible su implementación. A continuación se presentan recomendaciones específicas para los principales actores del ecosistema de infraestructura vial colombiana.

8.1.1 Para el Ministerio de Transporte y el Departamento Nacional de Planeación

El marco normativo colombiano ya contiene disposiciones favorables a la transformación digital del sector vial, particularmente en la Ley 1682 de 2013 y en el Plan Maestro de Transporte Intermodal 2021-2035. Sin embargo, existe una brecha significativa entre la norma y la práctica, como lo confirma la baja adopción tecnológica documentada en esta investigación. Se recomienda:

- Formular una Política Nacional de Transformación Digital para la Infraestructura Vial que establezca metas progresivas de adopción de BIM, IA y ciencia de datos en los proyectos financiados con recursos públicos, siguiendo el modelo de obligatoriedad gradual implementado por Finlandia y Corea del Sur, donde el uso combinado de BIM e IA se hizo obligatorio en proyectos públicos desde 2020.

- Crear un Fondo de Modernización Tecnológica para la Interventoría Vial que financie la adquisición de herramientas, la formación de talento humano y el desarrollo de infraestructura digital en las entidades de control, reconociendo que muchas interventorías carecen de los recursos necesarios para asumir estos costos por cuenta propia.
- Actualizar los pliegos de condiciones y contratos tipo de interventoría para incluir requisitos mínimos de capacidad tecnológica (uso de BIM, plataformas de gestión de proyectos, sistemas de reporte digital) como criterios de habilitación, generando incentivos de mercado para la adopción tecnológica.
- Fortalecer el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras (SINC), creado por la Ley 1228 de 2008 pero con implementación parcial, como plataforma central de datos para el monitoreo en tiempo real de todos los proyectos viales del país, integrando los datos generados por las plataformas de gestión de proyectos propuestas en los ejes estratégicos.

8.1.2 Para el INVÍAS y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI)

El INVÍAS y la ANI son los actores con mayor capacidad de transformar sistémicamente la gestión del portafolio de proyectos viales en Colombia, dado que actúan simultáneamente como entidades contratantes y como referentes técnicos para el sector. Se recomienda:

- Establecer laboratorios de innovación en gestión de proyectos viales al interior de ambas entidades, que sirvan como espacios para el desarrollo, prueba y validación de soluciones

tecnológicas antes de su escalación al portafolio completo. Estos laboratorios pueden operar en alianza con universidades y centros de investigación tecnológica.

- Implementar pilotos de BIM en los proyectos de mayor complejidad y mayor riesgo de desviación del portafolio, generando casos de estudio nacionales que documenten el impacto real de la metodología en el contexto colombiano y que sirvan como referencia para su adopción por parte de contratistas e interventoras privadas.
- Diseñar e implementar un Sistema de Calificación Tecnológica de Contratistas e Interventoras que evalúe y puntúe la capacidad digital de las empresas del sector, incorporando este componente en los modelos de selección objetiva, de manera que las organizaciones con mayor madurez tecnológica obtengan ventajas competitivas en los procesos de licitación.
- Establecer alianzas con la Contraloría General de la República para desarrollar interfaces de acceso en tiempo real a los datos de avance físico-financiero de los proyectos, eliminando la brecha de información que actualmente limita la capacidad de supervisión institucional y que fue identificada como una de las causas de las más de 1.647 alertas reportadas en 2024.

8.1.3 Para las empresas contratistas e interventoras

Las empresas del sector privado son los actores directos de la implementación, y sus capacidades determinan en última instancia la calidad del control de los proyectos en campo. Los resultados de la encuesta revelan que la mayoría de estas organizaciones no están aún en

condiciones de adoptar las tecnologías más avanzadas de manera inmediata. Por ello, las recomendaciones están orientadas a construir gradualmente las condiciones habilitadoras internas:

- Priorizar la designación de un líder de transformación digital en el corto plazo, incluso si inicialmente es un rol de tiempo parcial. La presencia de un responsable interno genera continuidad y dirección estratégica para las iniciativas de digitalización, reduciendo la dependencia de proveedores externos que el 65,8 % de las organizaciones ha identificado como su modelo predominante de gestión tecnológica.
- Comenzar la transformación digital por las aplicaciones de menor costo y mayor impacto inmediato: la implementación de plataformas de gestión de proyectos en la nube y el uso de dashboards de seguimiento no requieren inversiones de capital significativas y generan beneficios visibles en el corto plazo, facilitando la generación de consenso interno sobre el valor de la transformación digital.
- Invertir sistemáticamente en la formación de su talento humano en competencias digitales, aprovechando la oferta del SENA y de las universidades regionales. El déficit de capacidades identificado en análisis de datos (51,4 % con formación insuficiente) y en BIM (48,6 % con capacitación insuficiente en software colaborativo) representa el obstáculo más crítico para la adopción tecnológica a nivel de las organizaciones.
- Participar activamente en las comunidades de práctica intersectoriales que se proponen como parte del componente de gestión del cambio, reconociendo que el aprendizaje entre pares es uno de los mecanismos más efectivos para acelerar la adopción de innovaciones en sectores con alta heterogeneidad organizacional como el de la construcción.

8.1.4 Para las universidades e instituciones de educación superior

Las instituciones de educación superior tienen un rol estratégico como generadoras de talento humano calificado, como productoras de conocimiento aplicado y como aliadas en el desarrollo de soluciones tecnológicas adaptadas al contexto colombiano. Se recomienda:

- Actualizar los currículos de los programas de ingeniería civil e ingeniería de transportes para incorporar competencias en BIM, ciencia de datos aplicada a proyectos de construcción y gestión de información geoespacial, respondiendo a la brecha de formación documentada en esta investigación y preparando a los futuros profesionales del sector para operar en entornos digitales.
- Establecer líneas de investigación aplicada sobre implementación de IA, BIM y ciencia de datos en infraestructura vial colombiana, en alianza con el INVÍAS, la ANI y empresas del sector. La escasez de investigación nacional sobre estos temas, evidenciada en la revisión de literatura donde la mayoría de referencias provienen de contextos internacionales, representa una oportunidad para generar conocimiento contextualizado.
- Ofrecer programas de educación continua y certificaciones en tecnologías para la gestión de infraestructura vial, que permitan a los profesionales en ejercicio actualizar sus competencias sin necesidad de interrumpir su actividad laboral, respondiendo a la demanda de formación de nivel intermedio y avanzado identificada en el programa propuesto en el Componente 3.1.

En síntesis, la propuesta estratégica presentada en este capítulo configura un sistema de intervención articulado que reconoce la complejidad del problema, respeta las condiciones de madurez actual del sector y propone una transformación gradual, viable y fundamentada en evidencia empírica sólida. Su implementación exitosa dependerá de la voluntad política de las entidades públicas, la capacidad de adaptación de las organizaciones privadas y el compromiso de las instituciones académicas para generar el talento humano que la transformación digital del sector vial colombiano requiere.

La tecnología no reemplaza al profesional de la ingeniería ni a las instituciones de control. Las amplifica, les da mejores herramientas, les permite ver más lejos y actuar más rápido. El objetivo final no es digitalizar por digitalizar, sino garantizar que cada peso invertido en infraestructura vial se traduzca en una carretera terminada a tiempo, con la calidad esperada y al servicio de las comunidades que la necesitan.

Referencias bibliográficas

Adebayo, Y., Udoh, P., Kamudyariwa, X. B., & Osobajo, O. A. (2025). Artificial Intelligence in Construction Project Management: A Structured Literature Review of Its Evolution in Application and Future Trends. Digital, 5(3), 26.

Afranio, D. R. M., & Andrés, C. D. C. (2021). *Desarrollo de una guía para la implementación de la metodología BIM aplicada a las condiciones de proyectos de infraestructura vial en el territorio Colombiano.*

Attia, A. R. (2025). The impact of integrating artificial intelligence and Building information modeling (BIM) systems on the development of construction methodologies. Journal Of Umm Al-Qura University For Engineering And Architecture, 16(4), 1537-1554.

Amaya Vergara, D. S. (2022). *Administración estratégica del proyecto Vial en Colombia, Ruta del Sol. Universidad Militar Nueva Granda.*

Bang, S., & Olsson, N. (2022). Artificial Intelligence in Construction Projects: A Systematic Scoping Review. Journal Of Engineering Project And Production Management.

Basnyat, D., & Joshi, B. R. (2020). *Assessment of Road Project for Accelerating Permanent Connectivity. Saudi Journal of Engineering and Technology, 5*(1).

Berawi, M. A., Zagloel, T. Y., Miraj, P., Berawi, A. R. B., Titaheluw, W., & Karim, S. B. (2016). *Developing Road Infrastructure Route Planning: Increasing Feasibility of Toll Road Projects. Makara Journal of Technology*, *20*(3).

Bernal Torres, C. A. (2022). *Metodología de la investigación* (4.ª ed.). Pearson Educación.

Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). *Predictive*

Maintenance in Building Facilities: A Machine Learning-Based Approach. Sensors, 21(4), 1044.

Canales, F. A., Mora, O., Arrieta-Castro, M., Moreno-Natera, A., & Del Savio, A. (2023). *Analysis of delays and cost overruns of road construction projects in the Colombian Caribbean Region. Bulletin Of Geography Socio-economic Series, 61*.

Cardona Marín, Y., & Ortiz Galeano, C. (2017). *Asignación de riesgos en proyectos de infraestructura vial de cuarta generación bajo el esquema de asociación público privada en Colombia*. Universidad EAFIT.

Castañeda, K., Sánchez, O., Herrera, R. F., Gómez-Cabrera, A., & Mejía, G. (2024). *Building Information Modeling Uses and Complementary Technologies in Road Projects: A Systematic Review. Buildings, 14(3), 563.*

Cobo Pérez, B. S. (2017). *Análisis De Las Desviaciones De Tiempo Y Costo En Proyectos De Infraestructura Vial En Colombia.* Universidad De Los Andes.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2024). *Panorama de la infraestructura y la brecha tecnológica en América Latina.* Naciones Unidas.

Congreso de la República de Colombia. (2008*). Ley 1228 de 2008, por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 47.050

Congreso de la República de Colombia. (2013). *Ley 1682 de 2013, por la cual se adoptan medidas y disposiciones para los proyectos de infraestructura de transporte y se conceden facultades extraordinarias*. Diario Oficial No. 48.982

Congreso 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.

Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1712 de 2014, por medio de la cual se crea la Ley de Transparencia y del Derecho de Acceso a la Información Pública Nacional.* Diario Oficial No. 49.084.

Creswell, J. W. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Fifth Edition.*

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.

Departamento Nacional de Planeación –DNP–. (2021). *Plan Maestro de Transporte Intermodal 2021–2035*. Bogotá: DNP.

Dhenia, R. N. K. (2022). Data analytics in construction machinery: applications, challenges and future directions. World Journal Of Advanced Research And Reviews, 13(3), 649-653.

Egwim, C. N., Alaka, H., Demir, E., Balogun, H., Olu-Ajayi, R., Sulaimon, I., Wusu, G., Yusuf, W., & Muideen, A. A. (2023). Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle. *Energies*, *17*(1), 182.

Fonseca, P. J., Corredor, N. S. P., & Urbano, H. L. Z. (2024). Estado actual en la implementación de la metodología Building Information Modeling (BIM) aplicada a la infraestructura vial en Colombia. Avances Investigación En Ingeniería, 21(2 (Julio-Diciembre)).

Flores, V. A. A., & Ascaño, G. Z. (2025). Quantitative Risk Analysis Framework for Cost and Time Estimation in Road Infrastructure Projects. Infrastructures, 10(6), 139.

Florez-Perez, L., Song, Z., & Cortissoz, J. C. (2022). Predicting construction productivity with machine learning approaches. Proceedings Of The . . . ISARC.

Gómez Cabrera, A., León, L. C., Lopez, M. L., & Torres, A. (2025). Analyzing Time and Cost Deviations in Educational Infrastructure Projects: A Data-Driven Approach Using Colombia's Public Data Platform. *Buildings*, *15*(19), 3505.

Gómez, C. C. O., Herrera, R., Pellicer, E., Buitrago, A. A., & Aristizabal-Torres, D. (2023). Construction 4.0: Cluster analysis and Research perspectives. *Revista de Ingeniería de Construcción.*

Gordillo Chacón, F. A. (2022). Revisión Del Estado De Las Interventorías Realizadas En Obras Civiles En El Sector Público De La Ciudad De Barranquilla, Durante El Año 2020, Teniendo En Cuenta El Aspecto Técnico. Tesis De Pregrado, Universidad Cooperativa De Colombia.

Herrera, R. F., Gómez-Cabrera, A., & Mejía, G. (2024). *Building Information Modeling Uses and Complementary Technologies in Road Projects: A Systematic Review. Buildings, 14*(3), 563.

Hinostroza, P., Granados, J., & Bravo, A. (2021). *Proposal to Implement the BIM Methodology in Road Infrastructure Projects Optimizing Workflows.* In *Proceedings of the 7th CONIITI* (pp. 1-6).

INVÍAS. (2024). *Especificaciones generales de* construcción de carreteras (versión 2022 con modificaciones 2024). Bogotá: Instituto Nacional de Vías.

Jaimes-Quintanilla, M., Rozo-Rojas, I., Rodríguez-Barrera, D., & Zabala-Vargas, S. (2026). A smart framework for integrating artificial intelligence, data science, and IoT in construction project management. *In International Conference on Knowledge Management in Organizations* (pp. 393–404). Springer Nature Switzerland.

Khan, A. A., Bello, A. O., Arqam, M., & Ullah, F. (2024). *Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies.* Technologies, 12(10), 185.

Khodabakhshian, A., & Cecconi, F. R. (2025b). AI in Construction Project Management education: Insights from the «AI for Construction Project Management» Summer School. CIB Conferences, 1(1).

Kussl, S., & Wald, A. (2023). *Smart Mobility and its Implications for Road Infrastructure Provision: A Systematic Literature Review. Sustainability, 15*(1), 210.

Latorre Guerrero, M. M. (2019). *Levantamiento del velo corporativo por corrupción en contratación estatal: el caso de la concesión Ruta del Sol II*. Universidad de los Andes.

León Gutiérrez, L. G. (2021*). Estudio de la corrupción incitada por la empresa privada en los procesos de contratación Pública de Colombia: Mediante el Estudio de los Casos Proyecto Vial Ruta del Sol, Carrusel de la Contratación de Bogotá y Construcción de la Hidroeléctrica Guavio*. Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas.

Limas, D. F. (2020). *Metodología BIM aplicada a la fase de prefactibilidad de un proyecto vial de tercer orden en Colombia.*

Lo, A., & Alshehhi, A. (2025). Implementation of machine learning technologies in construction maintenance: A strategic analysis. Machine Learning With Applications, 22, 100731.

M. Saade Hazin y R. Constantino, “Financiamiento de la infraestructura para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe”, serie Comercio Internacional, N° 176 (LC/TS.2023/172), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

Ministerio de Transporte. (2023). *Informe de avance del Plan Maestro de Transporte Intermodal*. Gobierno de Colombia.

Peñaranda Pabón, J. D., & Ravelo Pérez, H. R. (2021). *Análisis de controles técnicos y administrativos de interventoría en las etapas precontractual y contractual de proyectos de construcción de vías terciarias* [Tesis de posgrado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña].

Prado, M. D. G. & CoST – Infrastructure Transparency Initiative. (2025). *Drivers of infrastructure delays: What can 480 projects across three continents teach us?*

Presidencia de la República de Colombia. (2015). *Decreto 1079 de 2015*.

Fawcett, Tom & Provost, Foster. (2013). *Data Science for Business.*

Project Management Institute (PMI). (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Project Management Institute.

Quintero, J., Murgas, A., Gómez-Cabrera, A., & Sánchez, O. (2025). Exploring the Relationship Between Project Characteristics and Time–Cost Deviations for Colombian Rural Roads. Infrastructures, 10(7), 178. https://doi.org/10.3390/infrastructures10070178

Revista Semana. (2024). *Contraloría hace nueva alerta por infraestructura vial en Colombia: atrasos en proyectos de acueductos y vías terciarias.*

Rey Ramos, M. (2024). *Case study on BIM for Box Culvert design in infrastructure modeling and quantity estimation*. Universidad de los Andes.

Rinchen, S., Banihashemi, S., & Alkilani, S. (2024). *Driving digital transformation in construction: Strategic insights into building information modelling adoption in developing countries.* Project Leadership And Society, 5, 100138.

Russell, S. J., & Norvig, P. (2004). *Inteligencia artificial: un enfoque moderno*. PRENTICE HALL.

Sampieri, R. H. (2018). *Metodología De La Investigación: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa Y Mixta*. McGraw Hill Mexico.

Samuelson, O., & Stehn, L. (2023). Digital transformation in construction – a review. *Journal Of Information Technology In Construction*, *28*, 385-404.

Sarmiento Rojas, J., Hernández Carrillo, C., & Güiza-Pinzón, F. (2023). *Complejidad en proyectos: generación de un modelo en el sector de la construcción colombiano*. Revista Científica, 47(2), 25-38.

Serna, S. L., Galindo, I. P., Gómez-Cabrera, A., & Torres, A. (2018). *Identificación de factores que generan diferencias de tiempo y costos en proyectos de construcción en Colombia. Ingeniería y Ciencia*, 14(27), 117-151.

Solano, J. C. L., Juvinao, D. D. L., Jim□nez-Pitre, I., & Consultor, R. C. (2018). Management control of infrastructure projects in the public entities of the Colombian department of La Guajira. Indian Journal Of Science And Technology, 11(26), 1-6.

Soto, D. R. (2018). *Evaluation of the impact of schedule risks in a road project*. *Revista Espacios. Vol 39.*

World Economic Forum. (2016). Shaping the future of construction a breakthrough in mindset and technology. En *https://www.weforum.org/publications/shaping-the-future-of-construction-a-breakthrough-in-mindset-and-technology*.

Zabala-Vargas, S., & Jaimes-Quintanilla, M. (2026). Framework ciberfísico y orientado a datos para la gestión de proyectos de construcción: Diseño y validación en contextos reales. Interfases, (23), 141–163. https://doi.org/10.26439/interfases2026.n023.8789

Zabala-Vargas, S., & Jaimes-Quintanilla, M. (2026). A holistic model for managing construction projects through artificial intelligence, data science, and IoT. In *2026 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)* (pp. 1–6). IEEE.

Zhang, J. (2023). *An overview of intelligent construction and maintenance technology for highway subgrade engineering. Intelligent Transportation Infrastructure, 2*.

Anexos

Anexo 1. Encuesta nivel de madurez tecnológica (apropiación) en la gestión de proyectos

Parte 1 de 5: MODELO DE NEGOCIO Y PRODUCTO - Nivel estratégico

Mediante las siguientes preguntas se identificará el nivel de transformación digital de su modelo de negocio y la implementación de la misma en sus productos.

Nota: Al hablar de producto se hace referencia a tangibles o intangibles y al hablar de producción es el proceso de creación de cada uno de ellos.

11. De acuerdo a la afirmación seleccione cuál nivel representa mejor la organización. *

	Nulo	Existe la iniciativa	En desarrollo	En implementación	En acción
Cuenta con estrategia de transformación digital formulada desde la alta dirección.	◯	◯	◯	◯	◯
Cuenta con indicadores para medir nivel del transformación digital.	◯	◯	◯	◯	◯
Tiene interés en la capacitación del talento humano en transformación digital.	◯	◯	◯	◯	◯
Alguno de sus productos integra tecnologías emergentes (Inteligencia artificial, big data o ciencia de datos).	◯	◯	◯	◯	◯
Reconoce importancia que tiene el uso y análisis de información.	◯	◯	◯	◯	◯
Identifica que el desarrollo y la innovación tecnológica juega un papel importante.	◯	◯	◯	◯	◯

Cuenta con claridad en los procesos y protocolos para llevar a cabo proyectos con alta incorporación tecnológica.	○	○	○	○	○
Reconoce los conceptos de tecnologías emergentes (Inteligencia artificial, Big-Data y Data Science).	○	○	○	○	○

12. En que área de su empresa ha invertido en los dos ultimos años? *

	Nula inversión	Pequeña inversión	Mediana inversión	Gran inversión
Investigación y desarrollo.	○	○	○	○
Producción de productos o servicios.	○	○	○	○
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano).	○	○	○	○
Logística de recepción y distribución.	○	○	○	○
Comercial y ventas.	○	○	○	○
Sistemas de información (herramientas software).	○	○	○	○

13. En que área de su empresa proyecta invertir en los proximos 5 años? *

	Nula inversión	Pequeña inversión	Mediana inversión	Gran inversión
Investigación y desarrollo.	◯	◯	◯	◯
Producción de productos o servicios.	◯	◯	◯	◯
Procesos administrativos internos (Contabilidad, talento humano).	◯	◯	◯	◯
Logística de recepción y distribución.	◯	◯	◯	◯
Comercial y ventas.	◯	◯	◯	◯
Sistemas de información (herramientas software).	◯	◯	◯	◯

Parte 2 de 5: CLIENTES Y PROVEEDORES

Mediante las siguientes preguntas se identificará el nivel de apropiación de las tecnologías habilitadoras de la transformación digital en su relación con clientes y proveedores.

14. De acuerdo a las siguientes afirmaciones seleccione cuál nivel representa mejor su organización.

	No se realiza	En algunos casos	En la mayoria de los casos	Se realiza permanentemente
Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de proveedores.	○	○	○	○
Implementa sistemas de información (herramientas software) para la gestión de clientes.	○	○	○	○
Analiza información de sus clientes para generar o mejorar productos o servicios.	○	○	○	○
Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus clientes.	○	○	○	○
Integra múltiples canales de comunicación en las interacciones con sus proveedores.	○	○	○	○

15. Indique el grado que mejor representa a su organización en los siguientes procesos:

	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Digitalización de trabajo con clientes.	◯	◯	◯	◯	◯
Digitalización de trabajo con proveedores.	◯	◯	◯	◯	◯
Intercambio de información digitalmente con socios, proveedores y clientes.	◯	◯	◯	◯	◯
Uso de múltiples canales de venta integrados para comercializar sus productos a sus clientes.	◯	◯	◯	◯	◯
Sistema de precios dinámico y adaptado al cliente.	◯	◯	◯	◯	◯

Parte 3 de 5: PROCESOS - Nivel táctico y operativo

Mediante las siguientes preguntas se identificará el nivel de apropiación de las tecnologías habilitadoras de la transformación digital en su proceso principal.

16. ¿Cual de las siguientes tecnologías utiliza en su organización? *

- [ ] Sensores
- [ ] Dispositivos móviles
- [ ] Identificador de radiofrecuencia - RFID
- [ ] Ciencia de datos para evaluación de información en tiempo real.
- [ ] Sistemas de localización en tiempo real
- [ ] Big Data para almacenamiento de grandes volumenes de datos
- [ ] Las tecnologías de la nube como infraestructura de TI escalable
- [ ] Inteligencia artificial para la toma de decisiones.
- [ ] Sistemas de tecnologías de la información integrados
- [ ] Otras

17. De acuerdo a las máquinas y equipos de su organización. ¿Cuál es el grado de implementación de las siguientes funcionalidades? *

	Nulo	Parcialmente	Implementado
Las máquinas y sistemas se pueden controlar a través de tecnologías.	◯	◯	◯
Comunicación entre maquinas / sistemas - M2M	◯	◯	◯
Capacidad de integrarse y colaborar con otras maquinas / sistemas - INTEROPERABILIDAD	◯	◯	◯

20. Identifique el nivel de cumplimiento de las siguientes afirmación en su proceso de creación y entrega de los servicios que ofrece la organización a sus clientes.

	NULO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
Nivel de integración de tecnologías digitales en la prestación de nuestros servicios	◯	◯	◯	◯	◯
Uso de herramientas digitales para mejorar la eficiencia en la prestación de servicios	◯	◯	◯	◯	◯
Registran datos o información del proceso de prestación de servicios	◯	◯	◯	◯	◯
Aprovecha los datos y análisis digitales para tomar decisiones en la prestación de servicios	◯	◯	◯	◯	◯
Nivel de adopción de tecnologías de automatización en la entrega de servicios	◯	◯	◯	◯	◯
Digitalización de la gestión de datos y registros en nuestra empresa de servicios	◯	◯	◯	◯	◯

Parte 4 de 5: INFRAESTRUCTURA Y SEGURIDAD

Mediante las siguientes preguntas se identificará el nivel de apropiación de las tecnologías habilitadoras de la transformación digital en su Infraestructura y gestión de la seguridad.

21. La siguiente área, para comunicarse con otras áreas de la organización, utiliza sistemas de información:
*

	Si	Parcialmente	No	El área no existe
Investigación y desarrollo.	◯	◯	◯	◯
Producción de productos o servicios.	◯	◯	◯	◯
Procesos administrativos internos (contabilidad, talento humano, etc).	◯	◯	◯	◯
Logistica, recepción y distribución.	◯	◯	◯	◯
Comercial y ventas.	◯	◯	◯	◯

22. La siguiente área, para comunicarse con clientes y proveedores, utiliza sistemas de información:
*

	Si	Parcialmente	No	El área no existe
Investigación y desarrollo.	◯	◯	◯	◯
Producción de productos o servicios.	◯	◯	◯	◯
Procesos administrativos internos (contabilidad, talento humano, etc).	◯	◯	◯	◯
Logistica, recepción y distribución.	◯	◯	◯	◯
Comercial y ventas.	◯	◯	◯	◯

23. ¿La organización , ya está utilizando servicios en la nube? *

	SI	No, pero lo planeamos	NO
Software desde la nube	◯	◯	◯
Para almacenamiento de datos	◯	◯	◯
Para evaluación de datos	◯	◯	◯

24. ¿Cómo está organizada su gestión en tecnologías de la información - TI? *

- ◯ Sin departamento de TI propio (implicación de un proveedor de servicios).
- ◯ Departamento central de TI.
- ◯ Departamento de TI descentralizado en las áreas especializadas (producción, desarrollo de productos, etc.).
- ◯ Expertos en TI integrados en los departamentos especializados.

25. Clasifique las siguientes afirmaciones de acuerdo a el nivel de cumplimiento de estos criterios en su organización *

	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Equipos de ultima tecnología	◯	◯	◯	◯	◯
Equipos o maquinas conectadas a servidores	◯	◯	◯	◯	◯

26. Califique las siguientes preguntas según la escala establecida: *

	Totalmente en desacuerdo	Parcialmente en desacuerdo	Ni de acuerdo, ni en desacuerdo	Parcialmente de acuerdo	Totalmente de acuerdo
La información de su organización se encuentra segura en el contexto de la transformación digital.	○	○	○	○	○
Realiza evaluaciones y auditorías de seguridad de la información en su organización como parte de la estrategia de transformación digital.	○	○	○	○	○
Promueve la conciencia y la capacitación en seguridad de la información entre los empleados de acuerdo a la transformación digital.	○	○	○	○	○
Las medidas de respuesta ante incidentes de seguridad de la información en su organización son efectivas	○	○	○	○	○

Parte 5 de 5: ESTRATEGIA Y EXPERIENCIA EN INDUSTRIA 4.0

Mediante las siguientes preguntas se identificará el nivel de conocimiento, adecuación y proyección de uso de las tecnologías habilitadoras de la industria 4.0.

27. ¿Cómo realiza la organización el registro de la información generada por los procesos (producción, comercial, calidad, mantenimiento, administración, etc.)?

- ◯ No registra información de los procesos.
- ◯ Todos los procesos se registran en papel.
- ◯ Algunos procesos se registran en papel y otros están digitalizados.
- ◯ Todos los procesos están completamente digitalizados.

28. ¿Dispone de alguna persona en la organización responsable de la transformación digital?

- ◯ No dispone de roles especializados.
- ◯ Se dispone de un rol especializado.
- ◯ Se dispone de varios roles especializados.
- ◯ Se dispone de una gran especialización de roles digitales claves para la Industria 4.0.

29. ¿Cómo evalúa las capacidades de sus empleados en relación con los requisitos futuros de la Industria 4.0?

	Irrelevante / no aplica	No capacitado	Capacitado, pero no lo suficiente	Capacitado suficiente y constantemente
Infraestructura.	◯	◯	◯	◯
Tecnología de automatización.	◯	◯	◯	◯
Análisis de datos.	◯	◯	◯	◯
Seguridad de los datos.	◯	◯	◯	◯
Seguridad de las comunicaciones.	◯	◯	◯	◯
Software de colaboración.	◯	◯	◯	◯
Desarrollo o aplicación de sistemas de asistencia.	◯	◯	◯	◯
Habilidades no técnicas, como el pensamiento sistémico y la comprensión de procesos.	◯	◯	◯	◯

30. ¿En qué medida ha abordado las ineficiencias de los procesos mediante la adopción de sistemas inteligentes (máquinas inteligentes, tecnología digital integrada)?

◯ No hay una adopción significativa de sistemas inteligentes (aún utilizando sistemas manuales o semiautomáticos)

◯ Sistemas inteligentes introducidos parcialmente en áreas cruciales para superar las ineficiencias locales.

◯ Se adaptaron importantes sistemas inteligentes en toda la empresa que ayudaron a optimizar los procesos.

31. ¿Cuál es la ambición estratégica de la organización con respecto al paso a la Industria 4.0?

- ◯ No se ha considerado todavía. No se contemplan beneficios/oportunidades.
- ◯ Se ha considerado pasar a la Industria 4.0 pero se desconoce como hacerlo.
- ◯ Se conocen los beneficios de la industria 4.0 y se tiene intención de implementarla.
- ◯ Se ha iniciado el proceso de implementación de la industria 4.0.

32. ¿Qué nivel de importancia tienen en la organización, como elemento diferenciador en el sector, las soluciones y tecnologías relacionadas con los siguientes habilitadores de Industria 4.0?

	Sin importancia	Importancia baja	Importancia media	Importancia alta	Importancia muy alta
Inteligencia artificial.	◯	◯	◯	◯	◯
Fabricación aditiva.	◯	◯	◯	◯	◯
Internet de las cosas.	◯	◯	◯	◯	◯
Big data y análisis de datos.	◯	◯	◯	◯	◯
Realidad virtual y aumentada.	◯	◯	◯	◯	◯
Plataformas y comunicaciones .	◯	◯	◯	◯	◯
Tecnologías en la nube (Cloud).	◯	◯	◯	◯	◯
Ciberseguridad.	◯	◯	◯	◯	◯
Marketing digital.	◯	◯	◯	◯	◯
Formación y personas.	◯	◯	◯	◯	◯
Robótica y automatización.	◯	◯	◯	◯	◯

Anexo 2. Declaración inicial e información general sobre Encuesta de nivel de madurez tecnológico

Encuesta nivel de madurez tecnológica (apropiación) en la gestión de proyectos

Objetivo:
Conocer el nivel de apropiación de tecnologías emergentes (Inteligencia Artificial, Ciencia de Datos e Internet de las cosas-IoT) en la gestión de proyectos de las organizaciones en Colombia

Autor:
Equipo de investigación de la Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO

Declaración inicial:
La presente encuesta hace parte del Proyecto de investigación: INTELIGENCIA ARTIFICIAL, BIG-DATA Y CIENCIA DE DATOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE PROYECTOS EN COLOMBIA.; de la Corporación Universitaria Minuto de Dios.
Este instrumento tiene una intención estrictamente académica e investigativa; y busca reconocer el uso, conocimiento e interés de apropiación de tecnologías emergentes (Inteligencia artificial, Big-Data y Ciencia de Datos) en la gestión de proyectos que tiene su organización.
Toda la información será tratada con altos estándares de confidencialidad, de forma anónima (presentación de datos generalizados) y cumpliendo la legislación vigente en Colombia.

Definiciones importantes
- **Transformación digital:** Es el proceso de integrar tecnologías digitales en todos los aspectos de una organización para mejorar la eficiencia, la innovación y la experiencia del cliente, y para adaptarse a un mundo cada vez más conectado y digital

- **Tecnologías habilitadoras de la transformación digital**: Son herramientas y soluciones tecnológicas claves, como la ciencia de datos, la inteligencia artificial y el big data, que permiten a las organizaciones modernizar procesos, mejorar la eficiencia y crear nuevas oportunidades de negocio en la era digital.

- **Industria 4.0:** Revolución que se caracteriza por la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, IoT, análisis de datos, robótica, entre otros; en los procesos de fabricación y/o generación de servicios para lograr mayor eficiencia, flexibilidad y personalización.

Gracias por su interés de participación.