

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ÁREA ACADÉMICA DE GERENCIA DE PROYECTOS
MAESTRÍA EN GERENCIA DE PROYECTOS**



Estrategia de integración de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción: diagnóstico, análisis y hoja de ruta estratégica

**Proyecto Final de Graduación para optar por el título de
Máster en Gerencia de Proyectos en el énfasis de proyectos empresariales
con el grado académico de Maestría**

Realizado por:

Crystal Marie Castillo Núñez

Cartago, Setiembre, 2025

DEDICATORIA

A mí.

A todo lo que fui, a lo que atravesé en silencio, a lo que elegí sostener incluso cuando parecía más fácil soltarlo.

A la que persistió, a pesar de las dudas, del cansancio, del miedo.

Este logro es una forma de recordarme que valió la pena seguir, y que la constancia también puede ser una forma de fuerza.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y personas cercanas, por estar presente en cada paso de este camino.

Por acompañarme en los días buenos y en los no tan buenos,

por creer en mí cuando yo no lo hacía y por sostenerme incluso a la distancia.

A Robin, por ser presencia, compañía y consuelo.

Por sus silencios sabios, su lealtad incondicional y por estar ahí,

siempre, recordándome que incluso los días más pesados terminan con un paseo y una mirada dulce.

Este trabajo no lo construí sola.

Es el reflejo de quienes caminaron conmigo, de los que me levantaron sin decir palabra y de aquellos que me recordaron que seguir adelante ya era, en sí mismo, un logro.

EPÍGRAFE

"Our doubts are traitors, and make us lose the good we oft might win, by fearing to attempt."

— William Shakespeare

ÍNDICE GENERAL

Cada índice debe presentarse en una nueva página

| | |
|--|------------|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| EPÍGRAFE | iii |
| ÍNDICE GENERAL | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | ix |
| ÍNDICE DE CUADROS | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS | xiv |
| RESUMEN | xv |
| ABSTRACT | xvi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Capítulo 1 Generalidades de la investigación | 3 |
| 1.1 Antecedentes de la investigación (Estado del Arte) | 3 |
| 1.1.1 Desempeño en costo como factor crítico en proyectos..... | 4 |
| 1.1.2 Evolución en la ejecución de presupuestos de construcción..... | 9 |
| 1.1.3 Inteligencia artificial y su aporte a la gestión de proyectos de construcción..... | 13 |
| 1.1.4 Aplicaciones generales de la IA en la gestión de proyectos..... | 28 |
| 1.1.5 Beneficios de la IA en proyectos..... | 29 |
| 1.1.6 Retos y limitaciones de implementar IA en la gestión de proyectos..... | 30 |
| 1.1.7 Inteligencia Artificial en el desarrollo de presupuestos..... | 32 |
| 1.2 Planteamiento de la hipótesis | 41 |
| 1.3 Objetivos | 42 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 42 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 42 |
| 1.4 Alcance y limitaciones | 43 |
| 1.4.1 Alcance..... | 43 |
| 1.4.2 Limitaciones..... | 45 |

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 2 Marco teórico..... | 47 |
| 2.1 Gestión del costo en proyectos de construcción | 47 |
| 2.1.1 Conceptualización de la gestión de costos | 48 |
| 2.1.2 El presupuesto como herramienta estratégica | 49 |
| 2.1.3 Beneficios clave de una adecuada gestión de costos | 51 |
| 2.2 Teoría de estimación de costos de proyectos de construcción | 53 |
| 2.2.1 Tipos y niveles de estimación..... | 53 |
| 2.2.2 Métodos tradicionales de estimación de costos | 55 |
| 2.2.3 Herramientas tradicionales utilizadas en la estimación de costos | 56 |
| 2.2.4 Desafíos frecuentes en la estimación de costos de construcción..... | 58 |
| 2.2.5 Criterios de validación en la estimación de costos..... | 60 |
| 2.3 Introducción a la Inteligencia Artificial | 61 |
| 2.3.1 Definición y evolución de la inteligencia artificial..... | 62 |
| 2.3.2 Subdisciplinas relevantes de la IA | 65 |
| 2.4 Teorías aplicadas a la integración de IA en la presupuestación de proyectos de construcción | 66 |
| 2.4.1 Modelos de adopción tecnológica aplicables | 67 |
| 2.4.2 Elementos clave en la integración de IA en la presupuestación | 68 |
| 2.4.3 Validación de resultados generados por IA..... | 69 |
| Capítulo 3 Marco metodológico..... | 72 |
| 3.1 Tipos de investigación..... | 72 |
| 3.1.1 Investigación Cualitativa..... | 73 |
| 3.1.2 Investigación Cuantitativa..... | 74 |
| 3.1.3 Investigación Mixta | 75 |
| 3.2 Categorías de la investigación | 76 |
| 3.3 Población y muestra – Sujetos de investigación | 78 |
| 3.4 Fuentes de información | 82 |
| 3.5 Técnicas y herramientas para la recopilación de datos..... | 83 |
| 3.5.1 Revisión bibliográfica..... | 84 |
| 3.5.2 Entrevistas semiestructuradas | 87 |
| 3.5.3 Encuestas estructuradas | 89 |
| 3.5.4 Estudios de casos | 90 |

| | | |
|---|--|------------|
| 3.6 | Procesamiento y productos de la investigación..... | 91 |
| 3.6.1 | Productos de la investigación..... | 92 |
| 3.6.2 | Técnicas de procesamiento | 94 |
| Capítulo 4 <i>Análisis de Resultados</i> | | 101 |
| 4.1 | Categoría A: Proyectos de construcción..... | 101 |
| 4.1.1 | Resultados de la revisión bibliográfica..... | 102 |
| 4.1.2 | Resultados de la encuesta estructurada | 105 |
| 4.1.3 | Resultados entrevistas semiestructuradas..... | 111 |
| 4.1.4 | Análisis de la Categoría A – Proyectos de Construcción | 114 |
| 4.2 | Categoría B: Gestión del costo en proyectos de construcción..... | 117 |
| 4.2.1 | Resultados de la revisión bibliográfica..... | 117 |
| 4.2.2 | Resultados de encuesta estructurada | 121 |
| 4.2.3 | Resultados entrevistas semiestructuradas..... | 126 |
| 4.2.4 | Resultados de los estudios de caso..... | 130 |
| 4.2.5 | Resultados del análisis comparativo de casos..... | 140 |
| 4.2.6 | Análisis de la Categoría B – Gestión de costos en proyectos de construcción | 142 |
| 4.3 | Categoría C: Inteligencia Artificial | 145 |
| 4.3.1 | Resultados de la revisión bibliográfica..... | 146 |
| 4.3.2 | Resultados de la encuesta estructurada | 153 |
| 4.3.3 | Resultados entrevistas semiestructuradas..... | 163 |
| 4.3.4 | Resultados de los casos de estudio..... | 167 |
| 4.3.5 | Resultados del análisis comparativo de casos..... | 180 |
| 4.3.6 | Análisis la Categoría C – Inteligencia Artificial..... | 185 |
| 4.4 | Triangulación de resultados | 190 |
| Capítulo 5 <i>Propuesta de Solución</i>..... | | 193 |
| 5.1 | Informe detallado sobre prácticas de Inteligencia Artificial actuales, destacando su impacto y áreas de oportunidad | 193 |
| 5.1.1 | Clasificación de herramientas de IA en presupuestación | 193 |
| 5.1.2 | Impacto en la eficiencia y precisión de la presupuestación | 195 |
| 5.1.3 | Beneficios y desafíos de la aplicación de IA en presupuestación | 197 |
| 5.1.4 | Áreas de oportunidad para el desarrollo de IA en presupuestación..... | 199 |
| 5.1.5 | Herramienta práctica: Cuadro de selección de IA por tipo de empresa | 201 |
| 5.1.6 | Consideraciones preliminares para el contexto costarricense..... | 203 |

| | | |
|------------|---|-------------------|
| 5.2 | Análisis de limitaciones para la implementación de IA en presupuestación | 205 |
| 5.2.1 | Limitaciones técnicas | 205 |
| 5.2.2 | Limitaciones operativas | 206 |
| 5.2.3 | Limitaciones culturales | 207 |
| 5.2.4 | Herramienta práctica: Guía de mitigación de barreras | 207 |
| 5.2.5 | Tabla visual: Impacto y frecuencia de las barreras identificadas | 209 |
| 5.2.6 | Consideraciones finales para el contexto costarricense | 210 |
| 5.3 | Informe de análisis comparativo de casos de éxito en la aplicación de IA en la gestión de proyectos de construcción | 211 |
| 5.3.1 | Análisis comparativo de casos de éxito | 211 |
| 5.3.2 | Áreas de oportunidad para mejorar la adopción de IA en presupuestación | 212 |
| 5.3.3 | Buenas prácticas identificadas y su aplicabilidad presupuestaria | 214 |
| 5.3.4 | Recomendaciones para optimizar el uso de IA en la gestión de costos | 215 |
| 5.3.5 | Ruta progresiva para la adopción de IA en presupuestación | 216 |
| 5.3.6 | Cierre del informe | 218 |
| 5.4 | Marco de referencia con una propuesta de hoja de ruta para la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción | 219 |
| 5.4.1 | Fundamentos de la propuesta: factores clave para la integración de IA | 220 |
| 5.4.2 | Propuesta de hoja de ruta para la adopción de IA en presupuestación | 224 |
| 5.4.3 | Estrategias operativas para una implementación efectiva | 236 |
| 5.4.4 | Guía práctica para profesionales del sector | 237 |
| 5.5 | Cierre del capítulo | 240 |
| | <i>Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones.....</i> | <i>243</i> |
| 6.1 | Conclusiones | 243 |
| 6.2 | Recomendaciones | 246 |
| | <i>Capítulo 7 . Referencias bibliográficas.....</i> | <i>252</i> |
| | <i>Capítulo 8 Apéndices.....</i> | <i>259</i> |
| 8.1 | Apéndice A: Ficha Bibliográfica | 259 |
| 8.2 | Apéndice B: Guías de Entrevistas | 261 |

| | | |
|-------------------------------|---|------------|
| 8.3 | Apéndice C: Cuestionario..... | 266 |
| 8.4 | Apéndice D: Ficha de Caso de Estudio..... | 270 |
| 8.5 | Apéndice E: Matrices Comparativas..... | 273 |
| 8.6 | Apéndice F: Fichas bibliográficas completadas..... | 276 |
| 8.7 | Apéndice G: Síntesis de los resultados de las entrevistas | 289 |
| 8.8 | Apéndice H: Fichas de casos de estudio completadas..... | 300 |
| Capítulo 9 Anexos..... | | 311 |
| 9.1 | Anexo 1: | 311 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 1.1. Tendencia anual de aplicaciones de IA en la industria de la construcción.</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 1.2. Tendencia en el uso de aprendizaje automático en los últimos años.</i> | <i>15</i> |
| <i>Figura 1.3. Frecuencia en la publicación de artículos sobre el uso de las subcategorías de IA en la industria de la construcción.</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 2.1. Evolución de las revoluciones industriales.</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 4.1. Percepción de los principales desafíos en proyectos de construcción.</i> | <i>106</i> |
| <i>Figura 4.2. Percepción de los principales desafíos que impactan en la rentabilidad y plazos de los proyectos. ...</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura 4.3. Percepción de las principales necesidades en la ejecución de proyectos de construcción.</i> | <i>109</i> |
| <i>Figura 4.4. Percepción de cómo se espera que evolucione la industria de la construcción en los próximos 5-10 años.</i> | <i>110</i> |
| <i>Figura 4.5. Percepción de las principales estrategias que utilizan las empresas para mitigar riesgos financieros en los presupuestos.</i> | <i>122</i> |
| <i>Figura 4.6. Apreciación de las principales mejores tangibles en costos y tiempo en proyectos donde se ha aplicado IA.</i> | <i>123</i> |
| <i>Figura 4.7. Percepción de los principales factores que aumentarían la confianza en el uso de IA para presupuestación.</i> | <i>124</i> |
| <i>Figura 4.8. Cantidad de personas que han participado en algún proyecto donde se haya implementado IA en presupuestación.</i> | <i>155</i> |
| <i>Figura 4.9. Percepción sobre los tipos de soportes o incentivos que podrían facilitar la adopción de IA en presupuestación.</i> | <i>156</i> |
| <i>Figura 4.10. Percepción de las principales estrategias que consideran necesarias para la adopción d IA en presupuestación.</i> | <i>157</i> |
| <i>Figura 4.11. Percepción sobre los principales desafíos para la adopción de IA en presupuestación.</i> | <i>158</i> |
| <i>Figura 4.12. Tendencia sobre si se ha notado una mejora tangible en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA.</i> | <i>160</i> |
| <i>Figura 4.13. Percepción de las principales estrategias utilizadas por la empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos.</i> | <i>161</i> |

Figura 4.14. Percepción sobre los principales factores que aumentarían la confianza en el uso de IA para presupuestación..... 162

Figura 5.1. Diagrama de ruta por etapas..... 226

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|------------|
| <i>Cuadro 1.1. Resumen de criterios de éxito y su relación con el criterio de costo.</i> | <i>5</i> |
| <i>Cuadro 1.2. Resumen de los beneficios de la gestión de costos en proyectos por orden de relevancia.</i> | <i>8</i> |
| <i>Cuadro 1.3. Resumen de ventajas y desventajas de los diferentes métodos de estimación de costos en proyectos de construcción.</i> | <i>12</i> |
| <i>Cuadro 1.4. Ventajas y limitaciones del aprendizaje automático en la construcción.</i> | <i>15</i> |
| <i>Cuadro 1.5. Ventajas y limitaciones de la visión por computadora en la construcción.</i> | <i>16</i> |
| <i>Cuadro 1.6. Ventajas y limitaciones de la planificación automatizada en la construcción.</i> | <i>17</i> |
| <i>Cuadro 1.7. Ventajas y limitaciones de la robótica en la construcción.</i> | <i>17</i> |
| <i>Cuadro 1.8. Ventajas y limitaciones de los sistemas basados en conocimiento en la construcción.</i> | <i>18</i> |
| <i>Cuadro 1.9. Ventajas y limitaciones de los procesos de lenguaje natural en la construcción.</i> | <i>19</i> |
| <i>Cuadro 1.10. Ventajas y limitaciones de la optimización en la construcción.</i> | <i>19</i> |
| <i>Cuadro 1.11. Uso de las diferentes subcategorías de IA dentro de la industria de la construcción.</i> | <i>21</i> |
| <i>Cuadro 1.12. Estado del arte y oportunidades potenciales de IA en la construcción.</i> | <i>26</i> |
| <i>Cuadro 1.13. Integración de BIM con IA en la gestión de costos.</i> | <i>33</i> |
| <i>Cuadro 1.14. Metodología de diferentes métodos de IA.</i> | <i>37</i> |
| <i>Cuadro 2.1. Métodos tradicionales de estimación de costos.</i> | <i>55</i> |
| <i>Cuadro 3.1. Definición de las categorías de la investigación.</i> | <i>77</i> |
| <i>Cuadro 3.2. Fuentes de información.</i> | <i>83</i> |
| <i>Cuadro 3.3. Relación de objetivos, productos de la investigación, fuentes de información y técnicas de investigación.</i> | <i>92</i> |
| <i>Cuadro 4.1. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.</i> | <i>105</i> |
| <i>Cuadro 4.2. Relación de preguntas de entrevistas con subcategorías de investigación.</i> | <i>111</i> |
| <i>Cuadro 4.3. Síntesis del análisis de la Categoría A.</i> | <i>116</i> |
| <i>Cuadro 4.4. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.</i> | <i>121</i> |
| <i>Cuadro 4.5. Relación de preguntas de entrevista con subcategorías de investigación.</i> | <i>126</i> |
| <i>Cuadro 4.6. Resumen de casos seleccionados.</i> | <i>131</i> |
| <i>Cuadro 4.7. Resumen de factores relevantes de los casos de estudio.</i> | <i>138</i> |

| | |
|---|------------|
| <i>Cuadro 4.8. Síntesis de aporte de los casos de estudio por categoría.....</i> | <i>139</i> |
| <i>Cuadro 4.9. Resumen comparativo de las diferentes herramientas utilizadas en los casos de estudio.....</i> | <i>141</i> |
| <i>Cuadro 4.10. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.....</i> | <i>154</i> |
| <i>Cuadro 4.12. Resumen de los casos seleccionados.....</i> | <i>167</i> |
| <i>Cuadro 4.13. Resumen de factores relevantes de los casos de estudios.....</i> | <i>178</i> |
| <i>Cuadro 4.14. Aplicación de matriz comparativa (parte 1).....</i> | <i>182</i> |
| <i>Cuadro 4.16. Síntesis de hallazgos Categoría C.....</i> | <i>189</i> |
| <i>Cuadro 4.17. Cuadro comparativo por categorías de estudio.....</i> | <i>191</i> |
| <i>Cuadro 5.1. Resumen de herramientas de IA mayormente utilizadas.....</i> | <i>194</i> |
| <i>Cuadro 5.2. Recomendación de IA según tipología de empresa.....</i> | <i>202</i> |
| <i>Cuadro 5.3. Guía de mitigación de barreras.....</i> | <i>208</i> |
| <i>Cuadro 5.4. Tabla tipo semáforo de clasificación de barreras según su frecuencia e impacto.....</i> | <i>209</i> |
| <i>Cuadro 5.5. Hoja de ruta estructurada para la adopción de IA.....</i> | <i>217</i> |
| <i>Cuadro 5.6. Síntesis de aprendizajes clave de los casos de estudio.....</i> | <i>218</i> |
| <i>Cuadro 5.7. Resumen de los aspectos clave de la etapa de exploración.....</i> | <i>228</i> |
| <i>Cuadro 5.8. Resumen de los aspectos clave de la etapa de piloto controlado.....</i> | <i>230</i> |
| <i>Cuadro 5.9. Resumen de los aspectos clave de la etapa de ajuste y escalamiento.....</i> | <i>232</i> |
| <i>Cuadro 5.10. Resumen de los aspectos clave de la etapa de integración plena.....</i> | <i>234</i> |
| <i>Cuadro 5.11. Instrumento de planificación según etapa de implementación de IA.....</i> | <i>238</i> |
| <i>Cuadro 8.1. Entrevistado 1.....</i> | <i>289</i> |
| <i>Cuadro 8.2. Entrevistado 2.....</i> | <i>290</i> |
| <i>Cuadro 8.3. Entrevistado 3.....</i> | <i>291</i> |
| <i>Cuadro 8.4. Entrevistado 4.....</i> | <i>292</i> |
| <i>Cuadro 8.5. Entrevistado 5.....</i> | <i>293</i> |
| <i>Cuadro 8.6. Entrevistado 6.....</i> | <i>294</i> |
| <i>Cuadro 8.7. Entrevistado 7.....</i> | <i>295</i> |
| <i>Cuadro 8.8. Entrevistado 8.....</i> | <i>296</i> |

| | |
|---|-----|
| <i>Cuadro 8.9. Entrevista 9</i> | 297 |
| <i>Cuadro 8.10. Entrevistado 10</i> | 298 |
| <i>Cuadro 8.11. Entrevistado 11</i> | 299 |

LISTA DE ABREVIATURAS

- IA:** Inteligencia Artificial
- TI:** Tecnologías de la Información
- BIM:** *Building Information Modeling*
- ERP:** *Enterprise Resource Planning*
- ML:** *Machine Learning*
- NLP:** *Natural Language Processing*
- ANN:** *Artificial Neural Network*
- CNN:** *Convolutional Neural Network*
- SVM:** *Support Vector Machine*
- GAN:** *Generative Adversarial Network*
- RNN:** *Recurrent Neural Network*
- MLP:** *Multilayer Perceptron*
- DL:** *Deep Learning*
- AEC:** *Architecture, Engineering and Construction*
- TOE:** *Technology-Organization-Environment Framework*
- TAM:** *Technology Acceptance Model*
- UTAUT:** *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*
- PMI:** *Project Management Institute*
- PMBOK:** *Project Management Body of Knowledge*
- USD:** *United State Dollar*
- CAD:** *Computer-Aided Design*
- CAMTIC:** Cámara de Tecnologías de Información y Comunicación de Costa Rica
- CFIA:** Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica
- APU:** Análisis de Precios Unitarios
- QTO:** *Quatity Take-Off*

RESUMEN

La presente investigación aborda la integración de la inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, una fase crítica para garantizar la eficiencia financiera y operativa en la industria. En un contexto marcado por la transformación digital, el estudio parte de los beneficios observados que está generando la incorporación de inteligencia artificial en la industria de la construcción, buscando identificar que aporte puede tener esta en el proceso específico de estimación de costos. Como objetivo general, se planteó desarrollar una propuesta estratégica para incorporar IA en la etapa de presupuestación, a partir de un análisis contextualizado del entorno técnico y organizativo.

La metodología adoptada combinó enfoques cualitativos y cuantitativos, mediante revisión documental, entrevistas semiestructuradas, encuestas y análisis de casos reales. Esta triangulación de técnicas permitió identificar barreras clave para la adopción tecnológica, mapear beneficios potenciales y construir una hoja de ruta ajustada al contexto latinoamericano, con énfasis en el entorno costarricense.

Entre los principales hallazgos, se evidenció un creciente interés por parte del sector en tecnologías como *machine learning*, procesamiento de lenguaje natural y modelos predictivos. Sin embargo, también se identificaron limitaciones significativas, como la falta de conocimiento técnico especializado, la resistencia al cambio y la ausencia de lineamientos estratégicos claros en muchas organizaciones. Las conclusiones apuntan a que la implementación efectiva de IA requiere un enfoque multidisciplinario y progresivo, que combine inversión tecnológica con gestión del cambio y fortalecimiento de competencias.

Finalmente, se recomienda fomentar investigaciones aplicadas que validen empíricamente las propuestas desarrolladas, promover alianzas entre sectores técnicos y constructivos, e impulsar políticas organizacionales que faciliten la transformación digital. Este trabajo final de graduación busca servir como punto de partida para futuras iniciativas que busquen modernizar la presupuestación y adaptarla a los nuevos desafíos de la industria.

Palabras Clave: Inteligencia Artificial, presupuestación de proyectos, gestión de costos, transformación digital y proyectos de construcción.

ABSTRACT

This research addresses the integration of artificial intelligence into the budgeting of construction projects, a critical phase for ensuring both financial and operational efficiency in the industry. In a context shaped by digital transformation, the study builds upon the benefits already observed from the incorporation of AI in the construction sector, aiming to identify its potential contribution to the specific process of cost estimation. The general objective was to develop a strategic proposal for incorporating AI into the budgeting stage, based on a contextualized analysis of the technical and organizational environment.

A mixed-method approach was employed, combining documentary review, semi-structured interviews, surveys, and case study analysis. This triangulation allowed the identification of key barriers to technology adoption, the mapping of potential benefits, and the construction of a roadmap tailored to the Latin American context, with a specific focus on Costa Rica.

The main findings revealed growing interest in technologies such as machine learning, natural language processing, and predictive models. However, several challenges were also identified, including the lack of specialized technical knowledge, organizational resistance to change, and the absence of clear strategic guidelines in many companies. The conclusions emphasize that the effective implementation of AI requires a multidisciplinary and progressive approach that integrates technological investment, change management, and capacity building.

It is recommended to promote applied research that validates the proposed roadmap, foster partnerships between technical and construction sectors, and encourage organizational policies that enable digital transformation. This thesis aims to serve as a starting point for future initiatives seeking to modernize budgeting practices and adapt them to the evolving demands of the construction industry.

Key Words: Artificial Intelligence, project budgeting, cost management, digital transformation and construction projects.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de acelerado desarrollo tecnológico, el sector de la construcción enfrenta el reto de adaptarse a nuevas herramientas que prometen optimizar procesos, reducir errores y mejorar la toma de decisiones. Entre estas herramientas, la inteligencia artificial ha ganado protagonismo por su capacidad de transformar tareas tradicionalmente manuales en procesos más automatizados, precisos y eficientes. A pesar de ello, la aplicación de IA en la etapa de presupuestación aún se encuentra en una fase temprana, aún persisten barreras técnicas, culturales y organizativas que dificultan su adopción.

La presente investigación surge como una respuesta a este escenario, con el objetivo de explorar cómo la inteligencia artificial puede integrarse de forma estratégica en la presupuestación de proyectos de construcción, una fase crítica para la planificación financiera y el éxito general de cualquier proyecto. Lejos de asumir que la tecnología por sí sola puede resolver las limitaciones existentes, este estudio propone una mirada integral, que reconoce que la transformación digital en la construcción exige no solo herramientas tecnológicas, sino también nuevas formas de pensar, liderar y gestionar los proyectos.

El trabajo parte del planteamiento de cuatro objetivos específicos: conocer, analizar y sintetizar las prácticas actuales de presupuestación desde un enfoque técnico y de gestión e proyectos, identificar las limitaciones técnicas, operativas y culturales que afectan la adopción de herramientas de IA en la gestión de costos, extraer lecciones de éxito aplicables a la presupuestación y diseñar un marco de referencia para la implementación de IA en la presupuestación de proyectos de construcción. Estos objetivos se concretan mediante cuatro entregables interconectados que guían el desarrollo progresivo de la investigación: un informe sobre prácticas de presupuestación actuales, un análisis de las limitaciones que presentan las herramientas de IA en presupuestación, un informe de análisis comparativo de casos de éxito y finalmente, una hoja de ruta estructurada, concebida como componente operativo del marco de referencia propuesto para facilitar la integración de IA en contextos reales.

La metodología empleada se basó en un enfoque mixto, apoyado en revisión documental, entrevistas semiestructuradas, encuestas y análisis de casos de estudio. Este enfoque permitió triangular información desde diferentes fuentes y perspectivas, construyendo así un entendimiento más profundo de la problemática. La investigación reconoce sus limitaciones, entre ellas, la imposibilidad de validar empíricamente la hoja de ruta propuesta y la ausencia de un experto en

tecnologías de la información como parte activa del equipo investigador, aspectos que constituyen oportunidades para futuros estudios.

A nivel general, este estudio pretende contribuir con un marco de referencia aplicable y contextualizado que pueda ser de utilidad para profesionales del sector construcción, responsables de proyectos, tomadores de decisión y académicos interesados en la innovación en gestión de costos. En un entorno donde la tecnología evoluciona rápidamente, el verdadero aporte de este trabajo es promover una actitud crítica, adaptable y propositiva frente al cambio.

En cuanto a su estructura, el documento se encuentra organizado en seis capítulos. El Capítulo 1 presenta el planteamiento del problema, los objetivos y el enfoque general del estudio. El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación, abordando tanto la gestión de costos como los fundamentos de la inteligencia artificial aplicada. El Capítulo 3 describe el diseño metodológico, detallando las técnicas de recolección de datos y el enfoque de análisis utilizado. El Capítulo 4 expone los principales hallazgos obtenidos, producto de los instrumentos aplicados y del análisis comparativo de casos. El Capítulo 5 presenta la propuesta final: un marco de referencia para la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Finalmente, el Capítulo 6 recoge las conclusiones, recomendaciones y lecciones aprendidas derivadas del proceso investigativo, así como una reflexión sobre los objetivos alcanzados y los entregables desarrollados.

Capítulo 1 Generalidades de la investigación

El presente capítulo presenta una revisión exhaustiva de bibliografía relativa a la gestión de costos de proyectos de construcción, haciendo un especial énfasis en presupuestos, como de los criterios que tiene incidencia directa en el éxito de cada proyecto (Aa et al., 2018; p.3). Además, se realiza un estudio de investigaciones recientes enfocadas en la aplicación de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) dentro de la industria de la construcción, con la finalidad de comprender su alcance e impacto en el campo. Esto con la finalidad de comprender el impacto que este tipo de tecnologías puede tener en la gestión de proyectos y sobre cuales campos del conocimiento se ha focalizado. Esta revisión se centra tanto en literatura general como en fuentes específicas aplicables al problema de investigación, con el objetivo de comprender el impacto potencial de estas tecnologías en los procesos de presupuestación, y en particular, en su integración dentro de la gestión de costos en proyectos de construcción.

Como resultado, al comprender el estado del arte en esta temática en particular, se logra determinar un vacío en el conocimiento, el cual se pretende aprovechar, potenciando el uso que estas tecnologías pueden ofrecer al quehacer diario dentro del campo de la gerencia de proyectos de construcción. Por lo que consecuentemente, se desarrolla la hipótesis de investigación, se exponen los objetivos y se esclarecen los alcances y las limitaciones determinadas para la presente investigación.

1.1 Antecedentes de la investigación (Estado del Arte)

El estado del arte en la presente investigación aborda la importancia del presupuesto como un indicador crítico en la gestión de proyectos de construcción, destacando desde la fase de planificación, ya que es una base bajo la cual se va a monitorear y controlar el proyecto en fases posteriores. La forma en la que se han realizado las estimaciones de costos en proyectos ha evolucionado significativamente con el pasar de los años, adoptando nuevas metodologías y herramientas tecnológicas que han permitido mejorar su precisión y eficiencia (Cholakis, 2012; p.12).

Bajo este contexto, la Inteligencia Artificial ha emergido como una herramienta transformadora en diversas industrias, siendo la industria de la construcción una de ellas, contribuyendo a la mejora de las operaciones del negocio, automatización y aumento de la

productividad en general (Abioye et al., 2021; p.1). Esta viene a aportar soluciones innovadoras para optimizar la gestión de proyectos. Su respectiva aplicación en el desarrollo de presupuestos representa una oportunidad para mejorar la exactitud de las estimaciones, reducir riesgos, optimizar el uso de los recursos y fortalecer la toma de decisiones basada en datos. Esta sección explora el impacto de la IA en la presupuestación, analizando su evolución, beneficios y desafíos en el sector de la construcción.

1.1.1 Desempeño en costo como factor crítico en proyectos

En una primera instancia, es relevante definir cuáles han sido los indicadores de éxito en la administración de proyectos. Este ha sido un tema altamente estudiado y discutido desde mediados de los años 1900 (Aa et al., 2018; p.1), en donde en una primera instancia fueron relacionados con el cumplimiento de los objetivos de tiempo, costo y calidad establecidos para cada proyecto. En la misma línea, por su parte, en un artículo publicado en la página del PMI (Caccamese & Bragantini, 2012), se hace mención del conocido “triángulo de hierro”, en donde los factores de éxito han sido asociados con el tiempo, costo, alcance y calidad. Este “triángulo de hierro” es uno de los conceptos más conocidos y aceptados para medir el éxito de los proyectos dentro del círculo de la gestión de proyectos (Stojcetovic et al., 2014; p.349).

De la misma forma, estas lecturas hacen hincapié en cómo esta delimitación en los indicadores de éxito ha ido cambiando con el paso del tiempo; y que, en muchos casos, puede definirse de distante forma de proyecto a proyecto dependiendo de sus características y su contexto (Aa et al., 2018; p.2). Asimismo, Caccamese & Bragantini (2012) hacen referencia al “triángulo suave”, el cual viene de integrar aspectos como, por ejemplo, la motivación individual, espacio social y espacio analítico/holístico. Estos dan una alta importancia a los aspectos relativos al equipo del proyecto a lo largo del ciclo de vida del proyecto y su impacto respecto al éxito del proyecto. En otras palabras, van más allá del “triángulo de hierro”, con la definición de otros indicadores para lograr definir si un proyecto es exitoso o no.

No obstante, a pesar de las diferentes corrientes de pensamiento respecto a este tema, como se puede observar en el Cuadro 1.1., los autores Aa et al. (2018; p.3) construyen una tabla incluyendo diversas fuentes, en donde resumen los diferentes factores de éxito según su propio criterio. Es relevante denotar que el factor del costo es un elemento repetitivo en la mayor parte de las definiciones.

Cuadro 1.1. Resumen de criterios de éxito y su relación con el criterio de costo.

| No. | Factores de éxito según diversos autores | Presencia del costo |
|-----|---|---------------------|
| 1 | Costo, tiempo, desempeño, satisfacción, uso y efectividad | x |
| 2 | Desempeño técnico, eficiencia en la ejecución del proyecto, implicaciones gerenciales y organizacionales, crecimiento personal, terminación del proyecto, innovación técnica, capacidad de fabricación y desempeño del negocio | |
| 3 | Desempeño en tiempo, costo, calidad, salud, seguridad y medio ambiente, y satisfacción al cliente | x |
| 4 | Costo, tiempo, cumplimiento con las especificaciones técnicas, satisfacción del cliente e interesados | x |
| 5 | Costo, tiempo, calidad, alcance, satisfacción del cliente, satisfacción del equipo de trabajo y satisfacción de los accionistas | x |
| 6 | Costo, calidad, tiempo, satisfacción del cliente, especificaciones técnicas, requerimientos funcionales, ingresos y ganancias, ventaja competitiva, cuota de mercado y reputación | x |
| 7 | Costo, tiempo, requerimientos técnicos, satisfacción del cliente y cumplimientos de objetivos | x |
| 8 | Satisfacción del cliente, completado a tiempo, completado con calidad estándar, ausencia de disputas, seguridad, completado en presupuesto | x |
| 9 | Calidad, tiempo, costo, salud, seguridad y ambiente, alcance, satisfacción del cliente, eficiencia en el uso de los recursos, efectividad, productividad, rentabilidad, experiencia ganada por el proyecto, cumplimiento de los objetivos del proyecto, sustentabilidad y confianza | x |

Nota: Adaptado del artículo Overview success criteria and critical success factors in project management (Aa et al., 2018; p.3.)

Como resultado, el factor del desempeño en costo, como un indicador clave para determinar si un proyecto es exitoso o no, se puede fundamentar con los beneficios que propicia una adecuada gestión del costo al proyecto. Algunos de estos beneficios son los siguientes:

- Ayuda a reducir los gastos del Proyecto, utilizando prácticas de gestión de costos para poner directamente el flujo de costos de los recursos en controles adecuados. Parte de estas prácticas son: (1) mejorar la eficiencia operativa; la gestión de costos garantiza que las actividades de los proyectos se gestionen en función de un presupuesto predeterminado. Esto para garantizar el buen funcionamiento de las actividades de la organización y del proyecto. (2) Mejorar la eficacia de las

adquisiciones, una gestión adecuada de los costos del proyecto garantiza que se identifiquen varios proveedores y se seleccione el más rentable para adquirir materiales y servicios que sean económicos, estándar y acorde a los requisitos del proyecto. (3) Agilizar las necesidades tecnológicas: la gestión de costos ayuda a evitar la implementación de tecnología innecesaria que no agrega valor a la organización, pero se suma al gasto general de la empresa (Okereke et al., 2022; p.25).

- Una correcta gestión de los costos permite identificar posibles ahorros en el uso de los recursos, al comparar el presupuesto inicial con los costos reales en el momento de la adquisición. Esa identificación facilita la toma de decisiones que pueden conducir a una reducción de los gastos del proyecto, mediante la implementación de acciones correctivas oportunas (Viter, 2024).
- Tener una línea base sobre la cual poder comparar el presupuesto planificado versus el costo actual, añade valor en el sentido de que permite la implementación de acciones correctivas en momentos oportunos del proyecto. Identificando las causas que generan que los costos se estén desviando, permite que se puedan proporcionar soluciones propicias en el tiempo oportuno para salvaguardar los recursos del proyecto (Bardu & Sandu, 2020; p.218). Además, permite analizar las tendencias de los costos para determinar si el proyecto va encaminado de forma sustentable (Viter, 2024).
- Una correcta gestión del costo brinda información relevante para mejorar la precisión de las estimaciones de futuros proyectos, lo que aumenta la confianza a la hora de concursar por futuros proyectos. Por ende, al tenerse mayor información de los costos por medio de análisis de proyectos previos, aumenta las posibilidades de realizarse estimaciones más certeras, ayudando a incrementar el volumen de proyectos ganados (Viter, 2024).
- Brindar a las partes interesadas confianza en el tipo de resultado que pueden esperar dentro del presupuesto proporcionado. Esto en conjunto con los posibles riesgos que se correrán, dando visibilidad sobre los desafíos potenciales y cuánto costaría eliminarlos (Viter, 2024).

- Lograr cumplir con la meta de ganancias planteada en el tiempo esperado y con la adecuada calidad del trabajo (Bardu & Sandu, 2020; p.221). Por ende, si no se realiza una adecuada gestión de costos, el proyecto podría consumir las ganancias, afectando la rentabilidad no solo del proyecto, sino también de la organización en general (Viter, 2024). Asimismo, si se logra incrementar los ingresos y las ganancias son maximizadas se abren las puertas para que la organización puede aprovechar otras oportunidades de inversión (Okereke et al., 2022; p.25).
- Otro de los fundamentos es que una correcta gestión de los costos de un proyecto captura la atención de los clientes, por medio del aumento del valor del dinero. Esto puede generar que los clientes quieran seguir trabajando con la empresa en futuros proyectos (Okereke et al., 2022; p.22).
- Impacta en la ventaja competitiva que puede tener una organización dentro de la industria. Puede llegar a aumentar la posición competitiva de las empresas más allá de sus rangos locales, fomentando la adopción de nuevas tecnologías (Okereke et al., 2022; p.26).

En el Cuadro 1.2. se visualiza un resumen de los beneficios de la gestión de costos en los proyectos. Estos son algunos de los beneficios, pero definitivamente se podrían enumerar más en cada una de las fases de este. Queda en evidencia la relevancia de la gestión de los costos para determinar el éxito del proyecto, especialmente en los grupos de proceso de planificación del proyecto. Como se puede observar en dicho cuadro, la gestión de costos tiene un alto impacto en los grupos de procesos de planificación, monitoreo y control y cierre. Por su parte, el grupo de procesos de planificación puede llegar a marcar la pauta, y si esta no es realizada de forma correcta, esta puede tener repercusiones a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Mas, no obstante, tampoco se puede obviar que por más precisión que contenga el presupuesto, si los costos no son monitoreados y controlados a lo largo del proyecto, pone en riesgo el éxito del proyecto. Por último, se da relevancia a las lecciones aprendidas, como un medio de mejorar la gestión de costos en fases de planificación en futuros proyectos.

Cuadro 1.2. Resumen de los beneficios de la gestión de costos en proyectos por orden de relevancia.

| | Beneficio | Impacto Grupo de Proceso |
|------|---|------------------------------------|
| 1.º | Ayuda a reducir el desperdicio y los gastos. | Planificación |
| 2.º | Mejora la necesidad de eficiencia operativa. | Cierre |
| 3.º | Ayuda a predecir futuros gastos. | Monitoreo y control, cierre |
| 4.º | Asegura la efectividad en procuraduría. | Planificación |
| 5.º | Maximiza las ganancias. | Planificación |
| 6.º | Ayuda a la corrección de cambios que pueden tener impacto en los resultados del proyecto. | Monitoreo y control |
| 7.º | Genera datos de costos para la evaluación comparativa de posibles proyectos futuros. | Cierre |
| 8.º | Conlleva a la satisfacción del cliente. | Monitoreo y control, cierre |
| 9.º | Mejora la relación calidad-precio para las partes y esto puede llevar a que un patrocinio se repita. | Planificación – cierre |
| 10.º | Ayudan a reposicionar las empresas para que sean más efectivas. | Cierre |
| 11.º | Asegura que el desempeño del costo esté monitoreado. | Monitoreo y control |
| 12.º | Ayuda a las organizaciones a tomar decisiones informadas que brinden crecimiento rentable y progreso. | Cierre |
| 13.º | Se controlan los costos específicos del proyecto y los del negocio. | Monitoreo y control |
| 14.º | La salud financiera del negocio es conocida a través del monitoreo de costos. | Monitoreo y control |
| 14.º | Las tendencias a largo plazo del negocio pueden ser analizadas. | Monitoreo y control |
| 16.º | Garantiza que el retorno de las inversiones aumente. | Planificación |
| 17.º | Ayuda a los gerentes de proyectos a establecer expectativas claras con los interesados. | Planificación, monitoreo y control |
| 18.º | Ayuda a establecer un costo excesivo sobre un elemento o componente. | Planificación |
| 18.º | Agilizar la necesidad tecnológica. | Cierre |
| 20.º | Ayuda a optimizar la planificación financiera de la organización. | Planificación, cierre |
| 21.º | Ayuda en la toma de decisiones que impacta los objetivos de los proyectos y los de la organización. | Cierre |
| 22.º | El alcance se mantiene bajo control. | Monitoreo y control |

Nota: Adaptado del artículo The role of construction management practices on construction organizations' strategic performance (Okereke et al., 2022; p.33).

En resumen, existen diversos indicadores que pueden demostrar si un proyecto puede ser considerado exitoso o no. A pesar, de que la definición de estos indicadores ha presentado variaciones a lo largo del tiempo, hay que destacar que el indicador de costo ha estado presente desde los inicios y sigue siendo vigente y relevante en la actualidad. La gestión de costos es relevante a lo largo de todo el ciclo de vida, mas, no obstante, la gestión de los costos en la etapa de planificación, especialmente en la definición del presupuesto es clave, ya que representa la base bajo la cual se va a comparar en el resto de los procesos de la gestión de costos (procuraduría, adquisiciones, monitoreo y control, entre otros).

1.1.2 Evolución en la ejecución de presupuestos de construcción

Uno de los aspectos claves que se revisó en el apartado 1.1.1. es el beneficio de tener una línea base o presupuesto al inicio de la gestión del proyecto, como una variable que puede ayudar a aumentar las posibilidades de éxito. En cuanto al caso de la industria de la construcción, debido a que esta es considerada uno de los sectores más vulnerables a raíz de que se encuentra inmersa en un ambiente propenso a cambios sociales, económicos, culturales, ambientales, políticos, tecnológicos, entre otros., las metodologías y las herramientas para realizar los estimados y los presupuestos pueden diferir del tamaño, tipo, uso y contexto del proyecto (Idan & Dheyab, 2019; p.3734).

A través de los años las metodologías y las herramientas empleadas para la realización de estimaciones y presupuestos también han evolucionado según las tecnologías avanzan. Esta es una caracterización generalizada de cómo se ejecutaban los presupuestos según el periodo histórico:

1. **Antes del año 1980:** en esta época las mediciones se realizaban a mano, tomando medidas directamente de los planos constructivos. Los cálculos se realizaban mediante el uso de la calculadora. Usualmente los subcontratistas llamaban o enviaban un fax con el costo de sus servicios y los presupuestistas registraban esos datos en papel (Finch, 2013).
2. **1980s-1990s:** con la popularización del uso de la computadora en ambientes laborales, es muy común en este periodo de tiempo, la utilización de software tipo *spreadsheets* o hojas de cálculo para tabular la información (Finch, 2013). Un ejemplo muy conocido es Microsoft Excel o Lotus 1-2-3. Esta herramienta ayudó a mejorar las capacidades de los estimadores, a la vez que aumentó la velocidad

con la que realizaban los presupuestos (Cholakis, 2012; p.12). No obstante, a pesar de ser actualmente una tecnología accesible, es su momento podía resultar altamente costosa, por lo que muchas empresas dudaban sobre los beneficios de adquirirla (Merz, 2019).

3. **2000s - actualidad:** en este periodo, debido al internet se abrieron las puertas para el desarrollo de nuevas tecnologías especializadas en estimación de costos, tanto para calcular cantidades de materiales, como también para tabular la información con los precios. Asimismo, muchos negocios movieron sus operaciones a la nube y se consolida el *Software as-a-service* (SaaS), que generó que se encuentre disponible una amplia variedad de aplicaciones especializadas en presupuestos de construcción desde la nube y a precios accesibles. Se ha visualizado como se están desarrollando softwares en donde se puede realizar la cuantificación de materiales en la misma aplicación en la que se introducen los precios, lo que integra las diversas funciones del presupuestista en una sola herramienta, reduciendo la posibilidad de error humano. SaaS es uno de los aspectos que seguirá en tendencia en el futuro.

Por otro lado, la utilización del Smartphone como una herramienta de trabajo generó que se facilitara la comunicación entre los diversos actores durante el proceso de estimación (Finch, 2013).

4. Nuevas tendencias:

- a. **Incremento del uso de BIM software:** se espera que la tecnología denominada *Building Information Modeling* (BIM) esté disponible para una mayor cantidad de pequeñas y medianas empresas. Como menciona el texto traducido al español “(...) [BIM es] un modelo digital en 3D del edificio. (...) Un verdadero modelo BIM consiste en los equivalentes virtuales de las partes y piezas reales del edificio. ... Eso nos permite simular el edificio y comprender su comportamiento en un entorno informático mucho antes de que comience la construcción real.” Esto permite que se pueda extraer del modelo todas las cantidades necesarias para poder realizar el estimado (Finch, 2013).

A pesar de que no es un software diseñado para la finalidad de estimación de costos, su integración con software de estimación lo volverá aún más esencial para los contratistas que buscan optimizar sus procesos de presupuestación (Alastair, 2024).

- b. **Adopción de inteligencia artificial para estimación de costos:** respecto a este tema, el cual se va a desarrollar más profundamente en el apartado 1.1.4, es inevitable la transformación que está produciendo la inteligencia artificial (IA) en múltiples industrias a nivel global y la construcción no es la excepción.

Un aspecto relevante es como la IA está ayudando a automatizar diferentes tipos de tareas repetitivas, como, por ejemplo, en el desglose de medidas, promoviendo que los estimadores se concentren en otras labores más de carácter estratégico (Alastair, 2024).

- c. **Drones y escaneo láser para obtener datos precisos del sitio:** así como lo indica su nombre, la utilización de drones y escaneos láser está revolucionando la forma en que se está recolectando la información de sitio, lo cual ayuda increíblemente a los procesos de estimación de costos, al tener datos más precisos e información más completa. Esta información de carácter topográfico facilita los cálculos de movimientos de tierras y movilización de los materiales en sitio, así como en la determinación de tipo de maquinaria pesada que se va a requerir.

Además, las tecnologías de escaneo láser permiten la creación de modelos 3D de alta definición, permitiendo que los estimadores tomen en consideración estructuras o edificaciones existentes (Alastair, 2024).

Los tipos de metodologías y herramientas han cambiado con forma los avances tecnológicos se han ido presentando y han sido cada vez más accesibles para las organizaciones. Como se puede visualizar en el Cuadro 1.3., cada uno de ellos presenta sus ventajas y desventajas. Conforme el tiempo va pasando, las nuevas herramientas buscan corregir las desventajas de aquellas que estaban antes, por lo que no es de extrañar que este siga siendo un ciclo sin final. La búsqueda por optimizar y facilitar los procesos de estimación de costos ha llevado a la adopción

de inteligencia artificial como un medio para no solo optimizar los recursos, ahorrando tiempo, sino también, como un medio para disminuir el error humano.

Cuadro 1.3. Resumen de ventajas y desventajas de los diferentes métodos de estimación de costos en proyectos de construcción.

| Métodos | Ventajas | Desventajas |
|---|---|---|
| Métodos manuales (años 1980s) | Baja curva de aprendizaje (Finch, 2013) | Altas probabilidades de error humano (Finch, 2013) |
| | Siempre disponible (Finch, 2013) | Dificultad para compartir o colaborar (Finch, 2013) |
| | Gratis o muy bajo costo (Finch, 2013) | Flujo de trabajo inconsistente (Finch, 2013) |
| “Spreadsheets” / Hojas de cálculo (años 1980s-1990s) | Cálculos programables (Finch, 2013) | Dificultad para compartir o colaborar (Finch, 2013) |
| | Decrece la probabilidad de error humano (Finch, 2013) | No se puede escalar (Finch, 2013) |
| | Bajo costo (Finch, 2013) | Dificultad para integrar a otros “softwares” (Finch, 2013) |
| | Flujo de trabajo más consistente (Finch, 2013) | Curva de aprendizaje intermedia (Finch, 2013) |
| Aplicaciones y software especializados (2000s-actualidad) | | No es amigable con proyectos de alta complejidad (Cholakis, 2012; p.12) |
| | | No se vincula con data histórica de proyectos (Cholakis, 2012; p.12) |
| | Cálculos automatizados (Finch, 2013) | Costos iniciales y recurrentes (Finch, 2013) |
| | Bajo margen de error (Finch, 2013) | Curva de aprendizaje alta (Finch, 2013) |
| | Ofertas/presupuestos de aspecto profesional (Finch, 2013) | Podría no integrarse con algunos “softwares” (Finch, 2013) |
| | Base de datos de costos de fácil búsqueda (Finch, 2013) | |
| | Permite que se procesen más volumen de estimaciones por colaborador (Merz, 2019) | |
| | Aumento en la velocidad en que se generan los presupuestos (Costminer, 2020) | |
| | Facilita llevar un seguimiento de todos los presupuestos de la organización (Costminer, 2020) | |
| | Acceso a una alta cantidad de data histórica de proyectos (Merz, 2019) | |
| | Aumento en la consistencia de la calidad de las estimaciones (Costminer, 2020) | |
| | Facilita que el producto generado sea de alta utilidad para los procesos posteriores en la etapa de operaciones del proyecto, ayudando a la administración del proyecto en general (facilita la gestión de las adquisiciones) (Costminer, 2020) | |
| | Algunas aplicaciones permiten llevar un control del inventario en bodega o en sitio, para que ese pueda ser considerado dentro de los presupuestos (Costminer, 2020) | |
| Fácil accesibilidad al software sin necesidad de estar atado a una localización específica (Costminer, 2020) | | |
| Usualmente los proveedores de SaaS ofrecen servicios robustos de seguridad, procurando mantener los datos bien seguros (Costminer, 2020) | | |
| Algunas aplicaciones permiten tener acceso a todos los documentos del proyecto desde la misma aplicación en donde desarrollan el presupuesto, centralizando la información (Merz, 2019) | | |

| Métodos | Ventajas | Desventajas |
|-------------------|--|-------------|
| Nuevas tendencias | Sistemas informáticos como el BIM ayuda a que se realicen actualizaciones y ajustes en tiempo real a medida que evoluciona el proyecto. Asimismo, puede generar despliegues de las cantidades de materiales precisas para el proyecto, ayudando con la disminución de los tiempos de estimación (Alastair, 2024) | |
| | Facilitan la colaboración activa entre los diferentes estimadores o involucrados (Alastair, 2024) | |
| | Respecto al IA, tiene la capacidad de hacer análisis predictivos tomando en consideración amplias bases de datos (Alastair, 2024) | |
| | Ayuda a considerar riesgos que pueden tener una implicación en el costo del proyecto (Alastair, 2024) | |
| | En cuanto a los drones y escaneo láser, se tiene una alta precisión en los datos que se obtienen e información mucho más completa (Alastair, 2024) | |
| | Permiten visualizar el contexto inmediato al proyecto y considerarlo en el presupuesto de ser necesario (Alastair, 2024) | |

Nota: Elaboración propia.

1.1.3 Inteligencia artificial y su aporte a la gestión de proyectos de construcción

La aplicación de tecnologías digitales, como lo es la Inteligencia Artificial (IA), ha ayudado en alcanzar contribuciones significativas en la mejora de las operaciones de los negocios, procedimientos de servicios y aumento de la productividad de las diferentes industrias en general. Esto ha generado que las organizaciones que las adopten obtengan mejores ventajas competitivas, comparado a aquellas que utilizan métodos y tecnologías tradicionales (Abioye et al., 2021; p.1).

La IA aplicada específicamente en la gestión de proyectos de construcción, es un campo relativamente nuevo, comparado al uso de estas en otras industrias. La construcción es una de las industrias menos digitalizadas que hay y se cree que en parte es debido a una cultura con una alta resistencia al cambio entre los diversos interesados. Esto sumado a posibles altos costos iniciales de implementación, desconfianza, falta de talento capacitado, conectividad de buen internet, entre otros, no ayudan a que la IA despegue con todo su potencial en este campo (Datta et al., 2024; p.2).

Asimismo, como una gran parte de las labores se realizan de forma manual por naturaleza, y se cuenta con escaso personal con conocimientos avanzados en tecnología y digitalización, se dificulta poder dar el siguiente paso. La ausencia de digitalización e incorporación de tecnologías en los procesos de gestión de proyectos han causado ineficiencias en el manejo de los costos, retrasos en el cronograma, desempeño pobre a nivel de calidad, toma de decisiones

desinformadas, baja productividad y bajos controles a nivel de salud y seguridad, entre otros (Abioye et al., 2021; p.1).

Sin embargo, se puede visualizar en la Figura 1.1, en donde se ve una tendencia de incremento en el interés del sector construcción en la IA a partir del año 2018, en gran medida como una solución para ayudar a optimizar los procesos y aumentar la productividad. La IA tiene el potencial de desempeñar un papel fundamental, ya que fomenta la implementación de una serie de estrategias digitales en los campos de arquitectura, ingeniería, construcción y gestión, que ayudan a resolver problemas intrincados y ambiguos de una forma intencional, inteligente y adaptativa, en beneficio de las organizaciones (Datta et al., 2024; p.2).

Se considera que este crecimiento en el interés en estos años se puede atribuir al desarrollo inicial de Inteligencia Artificial en la industria de la manufactura, lo que hizo que se expandiera sus dominios hasta la industria de la construcción, creando interés entre diversos actores del sector (Datta et al., 2024; p.3).

Figura 1.1. Tendencia anual de aplicaciones de IA en la industria de la construcción.



Nota: Adaptado de Datta et al. (2024, p.6).

Los avances de la IA dentro de la industria de la construcción se pueden ver reflejados dentro de las siguientes subcategorías:

- a. **Aprendizaje automático o *Machine learning*** (ML): ML o el aprendizaje automático ha sido implementado dentro de la construcción para diferentes

propósitos, entre ellos, estimación de costos, monitoreo de salud ocupacional y seguridad, predicciones de riesgos, mejora de la cadena de suministros y procesos logísticos, entre otros (Datta et al., 2024; p.2).

En términos generales, se puede observar en la Figura 1.2. como la tendencia en utilizar ML en la industria de la construcción ha ido en aumento en los últimos años. Por su parte uno de los principales usos y ventajas que este contiene es su capacidad de predicción, basado en datos históricos. Esta y otras ventajas se pueden ver en el Cuadro 1.4.

Nota: Adaptado de Datta et al. (2024, p.7).

Figura 1.2. Tendencia en el uso de aprendizaje automático en los últimos años.



Cuadro 1.4. Ventajas y limitaciones del aprendizaje automático en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|---|---|
| Perspectivas predictivas y prescriptivas relevantes | Datos incompletos |
| Incrementa la eficiencia | Aprendizaje a partir de datos en tiempo real, manejo de datos de alta dimensión, escalabilidad de modelos y computación distribuida |
| Ahorro de costos | |
| Mejora la seguridad | |
| Utilización eficiente de los recursos | |
| Reduce los errores y las omisiones | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- b. **Visión por computadora:** esta categoría de la IA tiene diferentes objetivos, por una parte, mejorar el monitoreo de la segura en los sitios de construcción, aumentar la eficiencia del trabajo y realizar un seguimiento de la salud estructural de la

edificación. Gran parte de las ventajas de esta tecnología radica en que no es invasiva con propiedades, se puede medir desde un área remota, es amigable con el usuario y es de acceso universal, ya que no requiere de instalación adicional (Datta et al., 2024; p.3).

Además, en cuanto al tema de las cámaras digitales, las cuales suelen ser de un costo accesible, se espera que su uso sea cada vez más frecuente en los sitios de construcción. Esto especialmente considerando proyectos con alto riesgo a nivel de seguridad, como edificaciones altas, o proyectos en donde el manejo de los materiales puede ser complejo y peligroso.

Asimismo, estas tecnologías enfocadas en la visión han probado ser efectivas en la detección de grietas en estructuras de concreto o asfalto, ayudando a identificar defectos y evaluar las condiciones de las infraestructuras civiles. Esto promueve que se pueda ejecutar las correcciones necesarias en el tiempo óptimo, para obtener estructuras aprobadas y correctamente construidas.

No obstante, como mencionan los autores, estas tecnologías aún se encuentran en desarrollo y aún falta camino para que puedan ser implementadas de una forma más generalizada (Datta et al., 2024; p.3). Otras ventajas y limitaciones de esta tecnología se pueden observar en el Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5. Ventajas y limitaciones de la visión por computadora en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|---|--|
| Inspecciones y monitoreo más rápido | Comprensión completa del sitio |
| Mayor precisión, fiabilidad y transparencia | Reconocimiento de acciones de equipos y/o trabajadores |
| Rentable | |
| Incrementa la productividad | Mejora de la precisión del seguimiento y visualización |
| Incrementa la seguridad | efectiva de los resultados de seguimiento |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- c. **Planificación automatizada:** este campo de la IA trata sobre habilitar sistemas inteligentes para que cumplan metas deseadas u objetivos por medio de la selección y secuenciación de acciones basado en los resultados esperados de cada una. Esto se puede ver reflejado en la planificación y programación de recursos en un

proyectos, desde a nivel de cronograma, hasta planificación de recurso humano o monetario; esto se puede adaptar a las necesidades del usuario y lo que se desea lograr (Abioye et al., 2021; p.3).

Cuadro 1.6. Ventajas y limitaciones de la planificación automatizada en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|---|---|
| Ahorro de costos debido al mejoramiento de procesos y logística | Puede ser caro de implementar |
| Aumento de la productividad | Podría ser complejo |
| Reduce los esfuerzos de planificación | Representaciones de conocimiento para modelos necesarios, problemas de monitorización, problemas de integración, técnicas de síntesis, etc. |
| Simplifica el monitoreo y control | |
| Planes y cronogramas óptimos | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- d. **Robótica:** la tecnología robótica ha encontrado diversas aplicaciones dentro de la industria de la construcción, como por ejemplo, abarcando diversas áreas como el ensamblaje, la gestión de sitio, la evaluación de rendimiento y el manejo eficiente de materiales y maquinaria de construcción (Datta et al., 2024; p.3). Como se visualiza en el Cuadro 1.7., parte de las ventajas con las que cuenta esta tecnología es el aumento de la seguridad, permitiendo a las máquinas hacer labores que usualmente son realizadas por humanos. No obstante, este es un tipo de tecnología muy especializada, la cual puede requerir de altos costos de inversión y personal especializado para poder operarla.

Cuadro 1.7. Ventajas y limitaciones de la robótica en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|--|---|
| Aumenta la seguridad | Altos costos de implementación |
| Incrementa la productividad | Problemas de adquisición de conocimientos |
| Mejora la calidad | Problemas de validación de conocimientos |
| Mayor fiabilidad y precisión | |
| Más rápido y consistente que el ser humano | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- e. **Sistemas basados en conocimientos:** esta rama de la inteligencia artificial está dedicada a la toma de decisiones de las máquinas basada en conocimiento existente. Esta base de conocimiento existente puede estar constituido por conocimiento experto, estudios de casos, proyectos completados, u otras fuentes relevantes. La idea principal es tener una interfaz en donde el usuario pueda interactuar, y desde donde tenga acceso a una amplia gama de conocimiento. Además, estos sistemas hacen inferencias y llegan a conclusiones que son heurísticas, flexibles y transparentes, y proporciona la lógica detrás del asesoramiento brindado cuando es necesario (Abioye et al., 2021; p.4). Esto puede resultar sumamente beneficioso, especialmente para el Gerente de Proyectos, ya que puede ser utilizado a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, brindando apoyo a la toma de decisiones basado en datos puntuales.

Algunas de las ventajas y limitaciones de esta tecnología son las siguientes:

Cuadro 1.8. Ventajas y limitaciones de los sistemas basados en conocimiento en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|--|--|
| Fácil acceso a información relevante | Problemas de protección de propiedad intelectual y seguridad |
| Fácil de actualizar | |
| Capacidad para explicar el razonamiento detrás | Problemas de validación de conocimientos |
| Consistencia y disponibilidad | Problemas de adquisición de conocimientos |
| Puede trabajar con información incompleta | |
| Lógica clara | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- f. **Procesos de lenguaje natural:** esta especialización de la IA está enfocada en crear modelos computacionales que imiten las capacidades lingüísticas de los seres humanos. Algunos ejemplos son: traducción automática, procesamiento y resumen de texto, interfaces de usuario, multilingüe y recuperación de información en varios idiomas, además, reconocimiento de voz y sistemas expertos (Abioye et al., 2021; p.4).

Cuadro 1.9. Ventajas y limitaciones de los procesos de lenguaje natural en la construcción.

| Ventajas | Limitaciones |
|--|--|
| Incrementa la productividad | Representación adecuada de un lenguaje fragmentado, extendido y erróneo. |
| Rentabilidad | |
| Eficiencia del tiempo | Problemas de reconocimiento de voz como ruido en la obra, homónimos, variabilidad del acento, etc. |
| Mejora la comunicación con los interesados | |
| | Problemas de seguridad de data y privacidad |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

- g. **Optimización:** así como el nombre lo sugiere, la optimización busca hacer las mejores decisiones para proveer el mejor resultado, basado en el conocimiento y las limitaciones que se le den. Como mencionan los autores Abioye et al. (2021, p.4) “El problema de la optimización es una construcción del problema de hacer la mejor elección entre un conjunto de opciones”. Se debe destacar que este es un fenómeno que se puede reproducir toda la vida, ya que siempre habrá que resolver problemas. El sector de la construcción no queda excluido en contener tareas repetitivas, por lo que esta tecnología resulta de alto interés. Como se puede observar en el Cuadro 1.10, esta tecnología beneficia en el aumento de la productividad, la eficiencia y, por último, en el ahorro de costos y tiempo.

Cuadro 1.10. Ventajas y limitaciones de la optimización en la construcción.

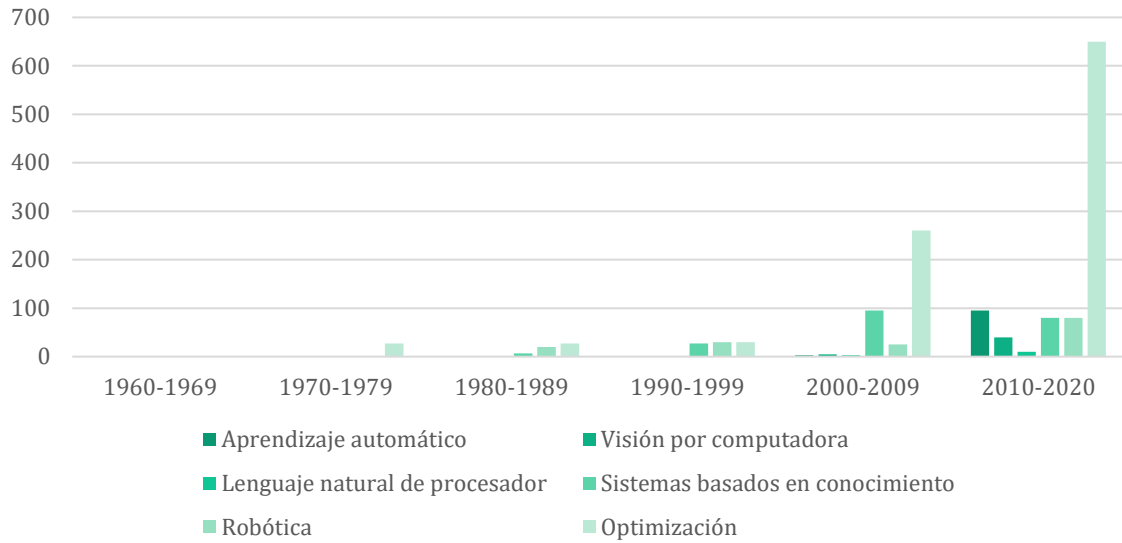
| Ventajas | Limitaciones |
|--|--|
| Incrementa la productividad debido a la optimización de procesos | Requiere una importante potencia informática |
| Aumento de la eficiencia | Problemas de escalabilidad |
| Ahorro de tiempo y costos | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.7)

En la Figura 1.3. se puede visualizar cuales de todas estas ramas de la inteligencia artificial fueron más utilizadas a través de los años, a la vez que queda en evidencia nuevamente el gran auge de estas hasta finales de la segunda década de los 2000. La optimización ha sido el área en donde ha existido mayor interés para investigación. Como indican los autores Abioye et al. (2021;

p.4), esto se puede atribuir al hecho de que históricamente, la industria de construcción es de los sectores que más problemas tienen con la productividad. Por su parte, la subcategoría de Procesos de lenguaje natural, es la que menor ha sido investigada en el sector.

Figura 1.3. Frecuencia en la publicación de artículos sobre el uso de las subcategorías de IA en la industria de la construcción.



Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.5)

Por su parte, en el Cuadro 1.11 queda ejemplificado el uso de estas subcategorías de la Inteligencia Artificial dentro de la industria de la construcción, en donde se tiene al aprendizaje automático, como uno de los contribuyentes con mayor diversidad de usos; seguido por los sistemas basados en conocimientos.

Cuadro 1.11 Uso de las diferentes subcategorías de IA dentro de la industria de la construcción.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Aprendizaje Automático | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Visión computarizada | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Automatización (planificación y programación) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Robótica | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sistemas basados en conocimiento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Procesamiento de lenguaje natural | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Optimización | | | | | | | | | | | | | | | | | |

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Salud y seguridad | 10. Planificación del proyecto |
| 2. Programación | 11. Gestión del conocimiento |
| 3. Estimación de costos | 12. Diseño |
| 4. Legal | 13. Gestión de riesgo |
| 5. Cadena de suministros y logística | 14. Estructuras temporales |
| 6. Monitorear el sitio y evaluación de desempeño | 15. Licitaciones |
| 7. Gestión de las adquisiciones | 16. Gestión de energía |
| 8. Planta y administración de maquinaria | 17. Sustentabilidad |
| 9. Ensamblaje fuera de sitio | |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.6)

A continuación, se va a ejemplificar el uso de la Inteligencia Artificial a lo largo del ciclo de la vida de un proyecto de construcción, una misma tecnología puede ser aplicada de diferente forma según la etapa en la que se encuentre. Estos son algunos ejemplos según los autores Datta et al. (2024, p.8-13), para mayor detalle ver Anexo #1:

Fase de Planificación: Esta es una de las fases más cruciales del proyecto, ya que los resultados de esta pueden influenciar significativamente el éxito del proyecto desde variables críticas como lo son el costo, el tiempo, la calidad y el alcance. Algunos de las aplicaciones del IA en esta etapa del proyecto son:

- Diseño: ayuda a predecir el consumo energético que pueden tener las edificaciones.
- Logística: simulaciones de posicionamiento estratégico de equipos de construcción. Planificación de rutas en el contexto de la capacitación de operadores de equipos pesados.
- Gestión del tiempo: predicciones de la duración del tiempo con mayor exactitud.
- Gestión del costo: predicción del costo de las edificaciones.

- Gestión del alcance: descomponer situaciones complejas en proyectos de construcción en subtarefas pequeñas y separables.
- Gestión del riesgo: predicción de posibles escenarios de riesgos laborales y de seguridad, y proponer posibles estrategias para mitigarlos. Planificación de entrenamientos de seguridad, reconocimientos e identificación de peligro; e instrucciones e inspecciones de seguridad.
- Monitoreo y control: seguimiento de entidades relacionadas con el proyecto mediante coordenadas espaciales 3D a lo largo del tiempo con técnicas automatizadas basadas en visión. Creación de un sistema que emplea realidad aumentada para mostrar actualizaciones en tiempo real del sitio de construcción.

Fase de diseño: las herramientas tradicionales, como, por ejemplo, AutoCAD a lo largo de la fase de diseño se han estado quedando cortas respecto al almacenamiento y administración de datos, lo que ha inclinado la balanza al uso de herramientas de IA. Estas tecnologías permiten no solo ser fuentes de información, sino también puntos de almacenamiento de la misma. Esto se puede ilustrar con el uso de sensores de seguridad, videos de drones, o sistema BIM. La incorporación de estos sistemas facilita el acceso a una amplia gama de información que facilita no solo la fase de diseño, sino también la gestión del proyecto en su generalidad. Algunos de los usos de la IA en la fase de diseño son:

- Diseño de la edificación: minimizar los conflictos entre los diferentes componentes MEP, el diseño arquitectónico y componentes estructurales, por medio de sistemas de detección. Utilización de sistemas especializados que generan dibujos arquitectónicos de forma automatizada.
- Diseño ingenieril: eficiente diseño de formaletas y visualizar la cantidad necesaria y su respectivo cronograma.
- Diseño de seguridad: visualización y simulación de la seguridad ocupacional a lo largo de la etapa de construcción.
- Gestión del alcance: mediante el uso de BIM disminuir la cantidad de petición de información (o RFI en inglés), habilitando que los diferentes interesados tengan acceso al modelo del proyecto.

- Gestión del costo: mediante el uso de BIM, habilitar que los estimadores accedan al modelo y de este obtener el desglose de medidas necesarias para los respectivos cálculos del presupuesto.
- Gestión de riesgos: análisis de riesgos potenciales asociados a los elementos de diseño teniendo en cuenta su frecuencia, gravedad y niveles de exposición.

Fase de construcción: representa uno de los momentos más transformadores del ciclo de vida del proyecto en términos de adopción tecnológica. En contraste con los métodos tradicionales, esta etapa ha incorporado un número creciente de tecnologías automatizadas y sistemas inteligentes que permiten optimizar recursos, reducir errores y mejorar la seguridad en obra. Las soluciones basadas en IA y aprendizaje automático (ML) están contribuyendo a una evolución radical en la manera en que se gestionan y ejecutan las actividades constructivas. Algunas de sus principales aplicaciones son:

- Automatización de tareas: uso de robots especializados para ejecución de actividades como ensamblaje automatizado, colocación de ladrillos, rociado de concreto, impresión 3D de concreto espumado, y fabricación in situ mediante robótica, lo cual reduce la necesidad de mano de obra intensiva y minimiza errores.
- Monitoreo en tiempo real: empleo de sensores distribuidos para recolectar y transmitir datos desde el sitio de obra, permitiendo al encargado del proyecto analizar y supervisar el rendimiento de los robots y de la maquinaria con base en información actualizada.
- Predicción de propiedades del concreto: utilización de modelos basados en ML como redes neuronales, lógica difusa o máquinas de vectores soporte para predecir con precisión propiedades mecánicas del concreto, particularmente en mezclas como el concreto autocompactante.
- Ergonomía y seguridad laboral: implementación de sensores de localización para estudiar el comportamiento de los trabajadores durante tareas de manipulación de materiales, con el fin de identificar riesgos ergonómicos y prevenir accidentes.
- Capacitación y concientización: uso de tecnologías como *chatbots* de mensajería (ej. *Telegram*) y simulaciones en realidad virtual para entrenar en seguridad,

aumentar la conciencia sobre riesgos y evaluar escenarios complejos en entornos interactivos.

- Gestión de recursos y materiales: incorporación de códigos inteligentes en los empaques de materiales de construcción mediante IA, lo cual permite rastrear información relevante como origen, historial de uso y calidad del recurso.
- Análisis de datos masivos: aplicación de Big Data en la recopilación y análisis de información relacionada con peligros en obra, apoyando la toma de decisiones en materia de seguridad y salud ocupacional con base en tendencias y eventos históricos.

Estas innovaciones reflejan una tendencia hacia la construcción inteligente, donde la toma de decisiones basada en datos, la automatización y la gestión avanzada de recursos configuran un entorno de obra más seguro, eficiente y tecnológicamente integrado.

Fase de operación y mantenimiento: la responsabilidad de la constructora suele reducirse considerablemente, lo cual limita su capacidad de supervisión directa sobre el desempeño del proyecto en uso. Esto plantea retos importantes para la recolección de datos y la continuidad del ciclo de información, especialmente cuando el modelo digital generado en fases anteriores no guarda una correlación directa con la edificación terminada. En este contexto, las tecnologías basadas en IA y aprendizaje automático han comenzado a ofrecer soluciones significativas para aumentar la eficiencia operativa, facilitar el mantenimiento predictivo y optimizar el uso de los recursos.

- Gestión del desempeño operativo: uso de sensores y modelos inteligentes para monitorear el rendimiento de sistemas como aire acondicionado, ventilación, iluminación y consumo energético. Esto permite ajustar parámetros en tiempo real y reducir el uso ineficiente de recursos.
- Mantenimiento predictivo: análisis de datos operativos en tiempo real para anticipar fallas o deterioro de equipos, permitiendo una intervención proactiva que reduce tiempos de inactividad y prolonga la vida útil de los sistemas.
- Gestión de instalaciones: integración de herramientas de realidad aumentada (AR) con datos de instalaciones para facilitar tareas de mantenimiento, limpieza y

operación, mostrando superposiciones digitales directamente sobre el entorno físico.

- Simulación de evacuación y seguridad: uso de simuladores dinámicos con IA para planificar rutas de evacuación, evaluar tiempos de respuesta ante emergencias y ofrecer a los ocupantes herramientas educativas con videos, mapas y alertas personalizadas.
- Control inteligente de ambiente interior: empleo de algoritmos basados en IA para regular la temperatura, la iluminación y la ventilación de forma automática, basándose en horarios de ocupación y condiciones del entorno.
- Optimización de rutas de mantenimiento: aplicación de ML para asignar tareas y planificar recorridos eficientes a equipos de robots de mantenimiento en interiores, especialmente en instalaciones complejas o de gran escala.
- Automatización de tareas menores: implementación de cámaras y sensores para detectar basura u otras condiciones no deseadas dentro del edificio, activando robots que ejecutan tareas de limpieza u operación de manera autónoma.

Estas aplicaciones reflejan cómo la inteligencia artificial puede extender su impacto incluso más allá de la fase constructiva, consolidando un modelo de edificación inteligente que se adapta, aprende y responde en función de su entorno operativo.

Fase de Demolición y Recuperación: Aunque esta etapa del ciclo de vida del proyecto suele ser subestimada o incluso ignorada por algunos investigadores, la fase de demolición y recuperación cobra cada vez mayor relevancia desde una perspectiva de sostenibilidad, economía circular y responsabilidad ambiental. La integración de tecnologías de inteligencia artificial y aprendizaje automático en esta etapa ha mostrado avances prometedores para optimizar la gestión de residuos, reducir emisiones de carbono y mejorar la reutilización de materiales.

- Predicción de materiales recuperables: mediante modelos de aprendizaje profundo es posible estimar con mayor precisión la cantidad de materiales (en toneladas) que pueden ser recuperados antes de la demolición, lo que permite una planificación más eficiente de los procesos de desmontaje.
- Gestión de residuos de construcción y demolición: integración de algoritmos temporales con modelos 4D-BIM para planificar la remoción secuencial y la

sustitución de materiales como concreto y paneles de yeso a lo largo de distintas fases del proyecto.

- Detección de elementos peligrosos: implementación de redes neuronales convolucionales para identificar objetos pequeños como clavos o tornillos dispersos, facilitando la recuperación automática mediante robots en tiempo real, lo cual contribuye a la seguridad del sitio y a reducir desperdicios.
- Evaluación de emisiones de carbono: desarrollo de marcos conceptuales que permiten estimar y analizar las emisiones generadas durante los procesos de demolición, apoyando así la toma de decisiones en escenarios donde se busca mitigar el impacto ambiental.
- Clasificación automatizada de residuos: uso de prototipos con IA para la separación eficiente de desechos con formas irregulares, facilitando su recolección y posterior reciclaje.

Esta fase constituye una oportunidad clave para cerrar el ciclo del proyecto con una visión sustentable. La aplicación de IA no solo mejora la eficiencia operativa del proceso de demolición, sino que también aporta herramientas para avanzar hacia prácticas más responsables con el medio ambiente y alineadas con objetivos globales de desarrollo sostenible.

Como se ha mencionado anteriormente, la IA dentro de la industria de la construcción es relativamente nueva. Abioye et al. (2021, p.8) hacen un recuento no solo del estado de arte de la IA en la construcción, sino que también detallan oportunidades potenciales de adopción de estas tecnologías en el futuro. En el Cuadro 1.12 se hace un resumen de ambos contenidos.

Cuadro 1.12. Estado del arte y oportunidades potenciales de IA en la construcción.

| Subdominio - industria de la construcción | Estado del arte | Oportunidades potenciales |
|--|--|--|
| Optimización de recursos y desperdicios | Análisis de datos para la gestión y recogida de residuos. Modelo 3D basado en BIM para la cuantificación de residuos de construcción. Marco de minimización de residuos de construcción basado en BIM. BIM para diseño de minimización de residuos. | Herramienta de análisis holístico de residuos basado en IA. |
| Servicios basados en valor: | | |
| Estimación y programación | Integración de BIM con IA para la gestión de costos y tiempo. | Aprendizaje profundo en conjunto con BIM para estimación de costos y tiempos. |
| Análisis de sitio de construcción | Control de proyectos de construcción. Análisis del rendimiento de la construcción. Planificación de la obra. | Análisis de sitios de construcción basados en BIM impulsado por IA. Chatbot de IA para información del sitio. |

| Subdominio - industria de la construcción | Estado del arte | Oportunidades potenciales |
|--|---|--|
| Creación de trabajo | Empleos y competencias BIM. Empleos verdes. Efectos de la automatización robótica en los empleos. | Desarrolladores de herramientas de automatización de la construcción. Capacitadores de sistemas. Probadores de sistemas. |
| IA y BIM con la industria 4.0: | | |
| IA con el internet de las cosas | Monitores inteligentes de la energía en edificios. Plataforma BIM habilitada para IoT ¹ para construcción prefabricada. IoT para advertencias de seguridad en sitios de construcción. | Plataforma de IoT impulsada por IA. BIM habilitado con IA para IoT. |
| IA con ciudades inteligentes | Gestión del consumo de energías en hogares inteligentes. Desarrollo de ciudades inteligentes y planificación urbana mediante sensores. Esquema de metadatos para infraestructura de edificios inteligentes. Rendimiento energético urbano mediante BIM y CIS. ² | Análisis del entorno construido impulsado por IA. Sistemas de gestión de edificios interoperables (BMS) ³ |
| IA con realidad aumentada | Gestión de defectos mediante BIM, RA y recopilación de datos basada en ontología. Realidad virtual basada en dispositivos móviles y realidad aumentada para la educación en materia de salud y seguridad. Áreas de aplicación de RA en la construcción. | Sistemas de exploración visual habilitado por IA. Exploración de sitios virtuales basado en IA y RA. ⁴ IA para lo planificado y lo construido. |
| IA y cadena de bloques | RFID ⁵ combinada con cadena de bloques para la logística de materiales. Integración de IoT, cadena de bloques y BIM para gestionar datos del ciclo de vida de los edificios. Cadenas de suministro de fabricación impulsadas por cadena de bloques en la industria de materiales compuestos. | Soluciones seguras y transparentes impulsada por IA para mejorar la confianza. |
| IA y computación cuántica | Computación cuántica. | Optimización de las soluciones de IA mediante computación cuántica. Análisis de datos BIM basados en IA y computación cuántica. |
| Administración de la cadena de suministros | Sistema de monitoreo de riesgos. Cadena de suministro móvil. Lenguaje de especificación de procesos para mejorar la comunicación de la cadena de suministros. | IA con cadena de bloques para la gestión de la cadena de suministros de construcción. Sistema de gestión integral de la cadena de suministros impulsado por IA. Chatbot de IA para la cadena de suministros. |
| Análisis de salud y seguridad | Identificación y prevención de riesgos de caídas basada en BIM. Biblioteca de conocimientos de diseño para la seguridad para revisiones de riesgos de seguridad integradas con BIM. Tecnología portátil para la seguridad y monitoreo personalizados de la construcción. Integración de tecnologías de sensores con BIM para la seguridad. | Aprendizaje profundo para análisis predictivos de salud y seguridad. Herramienta de gestión de salud y seguridad para monitoreo, visualización, notificación y acción. |
| Administración de contratos de construcción | Gestión de contratos de construcción mediante sistemas de empaquetado de valor. Tecnologías de cadena de bloques y criptomonedas para la gestión de bases de datos en ingeniería de la construcción. | Análisis de contratos de construcción impulsado por IA. Gestión integral de contratos impulsada por caen de bloques. |
| Interfaces de usuario de voz | Sistema de estimación de cantidades de construcción mediante ingreso asistido de voz. Integración de reconocimiento de voz y control de gestos para interacción con realidad aumentada para mejorar la práctica del diseño. | Interfaces de usuario de voz impulsadas por IA para su uso en diseño y actividades de construcción en el sitio y fuera del sitio. |
| Sistemas de auditoría de estados financieros de la construcción | Soluciones BIM 5D para la gestión de costos de construcción. Modelo de bid data basado en cadena de bloques para auditoría de modificaciones BIM. | Sistema de auditoría impulsado por IA para las finanzas de la construcción. |

Nota: Adaptado de Abioye et al. (2021; p.8)

¹ *Internet of Things*

² *City Information System*

³ *Building Management System*

⁴ Realidad Aumentada

⁵ *Radio Frequency Identification*

1.1.4 Aplicaciones generales de la IA en la gestión de proyectos

La inteligencia artificial se ha convertido en un recurso estratégico para apoyar múltiples funciones dentro de la gestión de proyectos, ofreciendo soluciones para automatizar procesos, optimizar recursos y mejorar la toma de decisiones. Su capacidad para analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar predicciones ha permitido su integración progresiva en distintas etapas del ciclo de vida del proyecto. Esta adopción responde a la necesidad de gestionar contextos cada vez más complejos, con cronogramas ajustados, restricciones presupuestarias y alta incertidumbre operativa.

Una de las aplicaciones más destacadas de la IA es su uso en la planificación de proyectos, especialmente en la predicción de cronogramas y la detección anticipada de desviaciones. A través de algoritmos de aprendizaje automático, es posible analizar datos históricos y condiciones actuales del entorno para proyectar escenarios más realistas. Según los autores Dam et al. (2018; p.4-6), en contextos de metodologías ágiles, la IA puede asistir en la priorización automática de tareas, análisis de desempeño de equipos y estimación de tiempos en función del comportamiento en iteraciones anteriores. Estas herramientas permiten ajustar los planes de manera dinámica y con base en evidencia.

Otra aplicación relevante se vincula con el monitoreo de la ejecución, donde la IA se emplea para detectar desviaciones entre el avance planificado y el real. La integración de IA con modelos de *Building Information Modeling* permite representar digitalmente el estado del proyecto, vinculando datos de sensores, drones o plataformas colaborativas con el modelo tridimensional. Por ende, esta combinación facilita la verificación automatizada del avance físico, la identificación de errores constructivos y la supervisión del cumplimiento de estándares técnicos (Ivanova et al., 2023; p.20). Esto contribuye a una gestión más rigurosa y en tiempo real, especialmente útil en proyectos de gran escala.

Además, la IA se aplica en la asignación de recursos y en la gestión del conocimiento. Los algoritmos inteligentes pueden evaluar múltiples variables, como, por ejemplo, disponibilidad, costo, carga de trabajo y criticidad; para distribuir recursos humanos y materiales de forma más eficiente. Asimismo, la IA facilita la extracción de información clave a partir de documentos técnicos, reportes históricos y bases de datos organizacionales, generando insumos para la toma de decisiones basadas en datos estructurados. Esta capacidad analítica no solo mejora la eficiencia

operativa, sino que también apoya el aprendizaje organizacional al sistematizar patrones de comportamiento y resultados de proyectos anteriores (Davahli, 2020; p.3-7).

En conjunto, estas aplicaciones reflejan cómo la inteligencia artificial puede integrarse de manera transversal en la gestión de proyectos. Su valor no se limita a la automatización de tareas, sino que reside en su capacidad para transformar datos en conocimiento accionable, mejorar la visibilidad del proyecto y fortalecer la toma de decisiones estratégicas. A medida que las organizaciones avanzan en la digitalización de sus procesos, se espera que el rol de la IA se consolide como un componente esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos de la gestión de proyectos.

1.1.5 Beneficios de la IA en proyectos

La implementación de IA en proyectos ha generado una transformación significativa en la manera en que se abordan los procesos de planificación, ejecución y control. Su aplicación va más allá de la automatización de tareas; se orienta a potenciar las capacidades humanas a través del análisis de datos, la predicción de escenarios y la generación de conocimiento procesable. Esta tecnología aporta beneficios concretos que fortalecen los objetivos de los proyectos, permitiendo una gestión más eficiente, ágil y adaptativa frente a la incertidumbre.

Uno de los principales beneficios de la IA es la mejora sustancial en la toma de decisiones. Al analizar grandes volúmenes de datos históricos y en tiempo real, los algoritmos son capaces de generar recomendaciones fundamentadas, reduciendo la dependencia del juicio subjetivo y minimizando errores humanos. Además, IA puede detectar patrones ocultos, correlaciones y desviaciones que pasarían desapercibidas mediante análisis convencionales, permitiendo decisiones más precisas y oportunas en cada etapa del ciclo de vida del proyecto (Ivanova et al., 2023; p.14-16).

La IA también contribuye significativamente a la optimización de recursos. A través del procesamiento inteligente de datos sobre disponibilidad, costos, rendimiento y criticidad de tareas, los sistemas pueden proponer asignaciones más eficientes y dinámicas. Esto es especialmente valioso en contextos complejos donde múltiples equipos, proveedores y limitaciones presupuestarias deben coordinarse de manera simultánea. Por tanto, los sistemas de IA permiten reasignar recursos y ajustar planes de forma automatizada con base en la evolución del proyecto, mejorando así la eficiencia operativa (Dam et al., 2018; p.5-6).

Otro beneficio clave es la reducción de errores y retrabajos. Esto se visualiza con los algoritmos de IA, al comparar continuamente lo planificado con lo ejecutado, permitiendo identificar desviaciones y generar alertas tempranas, lo que facilita la implementación de medidas correctivas antes de que los impactos se amplifiquen. Como resultado, esto tiene efectos directos en la reducción de costos asociados a fallas, errores técnicos o decisiones tardías. La IA ha demostrado aportar valor en la mejora de la calidad, el control de riesgos y la adherencia al cronograma, especialmente cuando se aplica en conjunto con metodologías como BIM o sistemas de monitoreo (Davahli, 2020; p.5-7).

Además, la inteligencia artificial favorece la gestión proactiva del conocimiento. Al analizar datos no estructurados de fuentes como informes, actas, contratos o lecciones aprendidas, los sistemas pueden identificar tendencias, buenas prácticas y áreas recurrentes de mejora. Esta capacidad analítica convierte la información dispersa en conocimiento útil para el proyecto en curso y para futuras iniciativas organizacionales. Ivanova et al. (2023; p.21) subrayan que esta función es fundamental para mejorar la madurez organizacional en la gestión de proyectos basados en datos.

En conjunto, los beneficios de la inteligencia artificial no solo se reflejan en métricas cuantificables como reducción de costos o tiempos, sino también en la creación de una cultura organizacional orientada a la mejora continua, al aprendizaje basado en datos y a la innovación en la forma de gestionar. Su valor estratégico radica en su capacidad de convertir la información en una ventaja competitiva sostenible dentro de un entorno de proyectos cada vez más dinámico, incierto y demandante.

1.1.6 Retos y limitaciones de implementar IA en la gestión de proyectos

A pesar del amplio potencial que representa la Inteligencia Artificial en la gestión de proyectos, su adopción enfrenta diversas barreras técnicas, organizacionales y éticas que limitan su integración efectiva. Estos desafíos no solo se relacionan con la complejidad de las herramientas tecnológicas, sino también con factores humanos, estructurales y culturales que dificultan su implementación en entornos reales. Comprender estas limitaciones es clave para establecer estrategias de adopción que no solo sean viables, sino sostenibles en el tiempo.

Uno de los principales retos identificados es la confiabilidad de los datos de entrada que alimentan los modelos de IA. La calidad, consistencia y representatividad de los datos son

fundamentales para que los algoritmos produzcan resultados útiles. Sin embargo, en muchos proyectos, los datos se encuentran dispersos, desactualizados o no estandarizados, lo que genera incertidumbre en los análisis automatizados. Se debe de tomar en consideración que, cuando los sistemas se entrenan con datos incompletos o sesgados, sus recomendaciones pueden amplificar errores y generar resultados poco confiables (Ivanova et al., 2023; p.21).

Además, existe una creciente preocupación sobre la transparencia de los modelos de IA, particularmente aquellos que operan como “cajas negras”, es decir, que generan resultados sin que los usuarios comprendan del todo cómo se alcanzaron. Esta falta de explicabilidad afecta la confianza que los profesionales podrían depositar en las herramientas, especialmente cuando las decisiones automatizadas impactan directamente en costos, plazos o riesgos del proyecto. Dam et al. (2018; p.6-7) señalan que, sin mecanismos adecuados de interpretación y supervisión humana, el uso de IA puede generar dependencia excesiva o, por el contrario, desconfianza e infravaloración de sus resultados.

A nivel organizacional, la implementación de IA también enfrenta limitaciones relacionadas con la resistencia al cambio y la falta de capacitación especializada. Muchas empresas, especialmente en industrias tradicionales como la construcción, no cuentan con una infraestructura tecnológica adecuada ni con personal preparado para integrar estos sistemas en sus flujos de trabajo. Por su parte, uno de los principales obstáculos en la adopción de IA radica en la falta de estrategias claras de implementación, así como en la ausencia de líderes que promuevan el cambio tecnológico desde una perspectiva de transformación digital (Davahli, 2020; p.8).

Asimismo, los costos asociados a la implementación de soluciones basadas en IA constituyen una barrera importante, especialmente para organizaciones pequeñas o con recursos limitados. Estos costos no solo incluyen la adquisición de software y hardware, sino también el entrenamiento de modelos, la limpieza de datos y la actualización continua de sistemas. Por tanto, los beneficios de la IA solo se alcanzan plenamente cuando se logra una integración coherente con los sistemas existentes, lo cual implica inversiones adicionales en interoperabilidad y compatibilidad tecnológica (Ivanova et al., 2023; p.29).

Por otro lado, también surgen cuestiones éticas relacionadas con el uso de IA en la toma de decisiones. Entre ellas se destacan los riesgos de sesgos algorítmicos, la protección de datos sensibles y la responsabilidad ante errores derivados de decisiones automatizadas. Aunque estos aspectos no son exclusivos de los proyectos, sí adquieren una dimensión particular en este

contexto, debido al impacto potencial de una mala decisión en el desempeño global del proyecto. En consecuencia, los equipos de gestión deben asumir un rol activo en la supervisión de los sistemas de IA, garantizando que su uso sea ético, justo y alineado con los valores organizacionales.

En definitiva, si bien la inteligencia artificial representa una oportunidad para revolucionar la gestión de proyectos, su adopción no está exenta de retos. La calidad de los datos, la transparencia de los modelos, la preparación organizacional y las consideraciones éticas son elementos clave que deben abordarse de forma integrada. Superar estas limitaciones no solo permitirá una implementación más efectiva de la tecnología, sino también una evolución más consciente y responsable en la forma en que se lideran los proyectos.

1.1.7 Inteligencia Artificial en el desarrollo de presupuestos

Los autores Akanbi & Zhang (2021; p.1) mencionan *“La estimación del costo de construcción es una tarea que requiere mucha mano de obra e involucra varios procesos. Aunque algunos de estos procesos se han automatizado, la estimación del costo de construcción aún depende en gran medida de insumos manuales”*. Como se analizó en la sección anterior, la inteligencia artificial ha ido ganando mayor presencia dentro de los procesos de gestión de proyectos de construcción, no siendo la gestión de costo la excepción. Al final del día, uno de los objetivos principales es lograr terminar el proyecto dentro del presupuesto establecido en la etapa inicial. Con la finalidad de lograr dicho objetivo, es necesario equipar a los estimadores con herramientas que les permitan enfrentar las incertidumbres y riesgos presentes en la realidad de la construcción hoy día (Chen et al., 2024; p.10). Esto ha generado que se introduzcan herramientas y nuevos métodos de estimación en donde se integre la inteligencia artificial en parte o en totalidad de los procesos.

BIM es una de las tendencias tecnológicas con mayor auge en los últimos años, y con ello se ha logrado que muchos procesos se encuentren en automatización. No obstante, uno de los componentes que esta metodología de trabajo con desventaja es que este solamente cuenta con la información que contenga el modelo. Consecuentemente, aplicar BIM para la estimación de costos o de tiempo en la actualidad, presenta muchos retos. Mas, no obstante, esto representa una oportunidad para que otras tecnologías como el IA vengan a dar soporte a BIM, en todos aquellos aspectos en donde tiene debilidades (Abioye et al., 2021; 6)

La integración de BIM con IA conlleva a la creación de una gran sinergia, en donde cada una aporta desde sus fortalezas; BIM provee un modelo con alto nivel de detalle y la IA toma dicha información y aplica análisis inteligentes y capacidades predictivas para la estimación de costos. Es importante destacar que entre mayor detalle tenga el modelo de BIM, como, por ejemplo, datos geométricos, especificaciones de materiales, de cronograma, entre otros; mayor será el insumo que con el que se alimenten los algoritmos de IA, lo que conlleva a predicciones con mayor veracidad. Esto incluso se puede reflejar en el análisis que IA puede realizar con datos de modelos de proyectos completados para poder predecir futuras tendencias. Como resultado, brinda mayor información para que los profesionales en construcción puedan tomar sus decisiones (Rane, 2023; p.6)

Por su parte algunos beneficios que puede brindar la integración de BIM con AI desde la perspectiva de diferentes elementos que componen un presupuesto, se puede visualizar en el Cuadro 1.13. Como menciona Rane (2023; p.6), la integración de BIM con IA representa un cambio en el paradigma dentro de la industria. La Inteligencia Artificial se encuentra desarrollando constantemente, por lo que los beneficios que esta podría aportar a nivel de costos en el futuro continuarán expandiéndose. Parte de los ejemplos que menciona la lectura es el desarrollo de algoritmos que tengan un nivel alto y preciso de predicción que ayude a optimizar los presupuestos, de la mano a proponer formas óptimas de administrar los recursos.

Cuadro 1.13. Integración de BIM con IA en la gestión de costos.

| No. | Tipo de costo | Rol de BIM | Rol de AI | Integración de BIM & IA |
|-----|-------------------|---|---|--|
| 1 | Costo de material | BIM garantiza una estimación precisa del material a través de modelos 3D y bases de datos | IA analiza datos históricos de materiales y tendencias del mercado para realizar análisis predictivos de costos | Los datos BIM se combinan con algoritmos de IA para optimizar las adquisiciones, prediciendo las necesidades de materiales y los costos de manera eficiente. |

| No. | Tipo de costo | Rol de BIM | Rol de AI | Integración de BIM & IA |
|-----|-------------------------------------|---|--|---|
| 2 | Costo de mano de obra | BIM ayuda en la asignación eficiente de mano de obra y la visualización del proyecto. | La IA estima los costos laborales basándose en datos históricos y parámetros del proyecto. | Los cronogramas BIM son analizados por IA, prediciendo los requisitos laborales y optimizando la asignación de fuerza laboral. |
| 3 | Costo de maquinaria | BIM ayuda en la planificación de equipos con consideraciones espaciales. | La IA predice averías en los equipos y optimiza su uso a través de datos de rendimiento. | Los datos de los equipos de BIM se integran con algoritmos de IA para un uso óptimo, reduciendo el tiempo de inactividad y los gastos de reparación. |
| 4 | Costos de diseño y planificación | BIM agiliza los procesos de diseño colaborativo y proporciona visualizaciones detalladas. | La IA automatiza las evaluaciones de diseño y genera alternativas rentables. | La IA analiza los diseños BIM y automatiza las evaluaciones para una planificación optimizada y rentable. |
| 5 | Costos de construcción | BIM permite el modelado 3D y la detección de conflictos. | La IA monitorea los datos del proyecto en tiempo real, identificando problemas y desviaciones. | Los modelos BIM se integran con IA para realizar un seguimiento en tiempo real, lo que reduce los retrabajos y los costos relacionados con la construcción. |
| 6 | Costos de operación y mantenimiento | BIM ofrece datos detallados de activos para la planificación del mantenimiento. | La IA predice las necesidades de mantenimiento y optimiza la eficiencia operativa. | Los datos de activos de BIM se combinan con algoritmos de IA, lo que garantiza un mantenimiento proactivo y operaciones rentables. |

Nota: Adaptado del artículo Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: challenges and opportunities (Rane, 2023; p.7)

Como complemento a lo expuesto en el Cuadro 1.13, es importante precisar que la integración de IA en procesos de presupuestación parte de una serie de insumos fundamentales, como modelos BIM con información geométrica y paramétrica, bases de datos históricas de costos, catálogos actualizados de precios, cronogramas y parámetros técnicos sobre rendimientos, cantidades y condiciones del proyecto (Abioye et al., 2021). Estos insumos permiten a los modelos de IA analizar, predecir y optimizar resultados presupuestarios, especialmente cuando se utilizan enfoques supervisados que requieren datos estructurados y etiquetados.

La automatización impulsada por IA ocurre principalmente en la estimación de cantidades, predicción de precios unitarios y generación de reportes dinámicos, permitiendo un mayor grado de precisión y eficiencia. Según Prieto (2020), la IA se posiciona como una herramienta clave para la validación de resultados en tiempo real, detectando desviaciones y ajustando las proyecciones presupuestarias a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Por otro lado, dentro de algunos de los estudios en donde se busca poner en práctica la integración de BIM con IA, estos han sido aplicados de forma aislada y concentrados en alguna de las etapas del proceso. La estimación de costos de construcción se ha basado principalmente en 4 fases: (1) extracción de información y cantidades requeridas del modelo arquitectónico o de los planos constructivos. (2) Extracción de la información clave de las especificaciones técnicas. (3) Asignación de las cantidades extraídas a elementos de construcción o de costo. (4) Determinar el costo unitario de la obra o de elementos de costo para calcular con más detalle los presupuestos. Para lograr que el proceso de estimación sea completamente automatizado, es requerido que la herramienta a utilizarse logre automatizar todas las entradas manuales que se encuentran involucradas en cada uno de estos procesos Akanbi & Zhang (2021; p.1).

En la fase inicial, el estimador extrae la información del modelo o de los planos que es relevante para la presupuestación; usualmente esto se refleja en la toma de medidas (áreas, distancias lineales, unidades, entre otros) de aquellos elementos dentro de la estructura de desglose de trabajo, que van directamente relacionados un costo de materiales o mano de obra. Esto se puede realizar a través de BIM o en caso de no contar con un modelo, mediante métodos más de tipo manual. Akanbi & Zhang (2021; p.2) mencionan el artículo denominado como “*3D model-based quantity take-off for construction estimates*”, desarrollado en el 2017, en donde los autores se centraron en esta fase del proceso y desarrollaron un método para extraer dimensiones geométricas de modelos de 3D patentados para mejorar la precisión de esta fase del proceso.

Por otro lado, dentro del segundo proceso de estimación de costos, en donde el estimador extrae de las especificaciones técnicas información relativa a los materiales que deben de utilizarse, los sistemas constructivos requeridos, consideraciones especiales a la hora de ejecutarse la obra, permisos y/o restricciones de construcción que se deben de considerar, entre otra información relevante que va a ser utilizada posteriormente para presupuestar. Lo más común es que esta etapa esté reservada para colaboradores con experiencia y suelen tomar mucho tiempo. Para automatizar esta fase, la cual por su naturaleza ser propensa a errores humanos, los autores Akanbi

& Zhang (2021; p.4), proponen la creación de un nuevo método basado en proceso de lenguaje natural para desarrollar algoritmos que permitan extraer de forma automatizada información de diseño requerida para cualquier componente de construcción de las especificaciones técnicas que vienen en formato AIA; y además, hacer coincidir dicha información extraída con una base de datos de materiales. Se realizó un experimento con este método y se obtuvo una precisión del 100%, y duró un 5.56% del tiempo que tradicionalmente se utiliza para realizar esta actividad (p.13). No obstante, es importante destacar que el experimento solamente fue probado en una edificación basada en elementos de madera. Los autores tienen contemplado hacer pruebas con mayor variedad de materiales. Asimismo, está dentro de los planes ampliar la lectura de las especificaciones técnicas a otros formatos.

Por su parte, la integración de la visión por computadora aportaría obtener un conjunto de información mucho más detallada, como, por ejemplo, condiciones puntuales del sitio, comportamiento de las diferentes entidades que rodean el proyecto, el ambiente en el que se encuentra inmerso, lo cual puede alimentar la información que se modela en BIM. Esto se realiza mediante la toma de imágenes o videos que ayuden en la comprensión del proyecto en su globalidad. Algunos de los estudios se ven enfocan tecnologías de visión artificial que desarrollen un sistema de seguimiento inteligente de cronogramas de proyectos de construcción (Pishdad & Onungwa, 2024; p.533)

Dejando de lado la metodología de trabajo BIM, otra de las aplicaciones de AI dentro del área de presupuestos es la utilización de aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL) en los procesos de predicción de costos. Los autores Abed et al. (2022, p.2) realizan un estudio de la efectividad de la incorporación de estas técnicas de IA en proyectos de construcción civil estudiados por otros autores, basándose en criterios de tasa de efectividad y el periodo del proyecto con el presupuesto final estimado. A lo largo del proceso de análisis, los autores llegaron a las siguientes conclusiones respecto a problemas actuales en el uso de la tecnología y recomendaciones que ellos proponen.

Primero, la predicción que la tecnología provea va a estar basada en la base de datos con la que se cuente. Como consecuencia, si la base de datos no se encuentra completa o no es lo suficientemente robusta, se corre el riesgo de que la predicción no vaya a ser precisa. Además, se menciona que mucha de información de costos de proyectos de construcción de carácter civil, no se encuentra actualizada o no ha sido publicada, lo que cual hace que la información disponible no

sea de significancia para poder cumplir con el objetivo Abed et al. (2022, p.8-9). Segundo, explican que las necesidades de la industria de la construcción suelen ser diferentes a las de otras industrias, por lo que las aplicaciones de IA han tenido que ser aisladas. Esto genera que a la hora de comparar el uso de ML y DL en la predicción de costo en criterios de efectividad y eficiencia sea un proceso muy complejo, esto se puede ejemplificar con el Cuadro 1.14, en donde se visualizan diferentes ejemplos de la aplicación de estas tecnologías, los métodos empleados y los resultados obtenidos; todos tienen características distintas. Es requerido la experimentación en una plataforma unificada para poder así comparar resultados de una forma correcta.

Cuadro 1.14. Metodología de diferentes métodos de IA.

| Project | Colección de conjuntos de datos | ML ⁶ | DL ⁷ | Efectividad | | |
|---------|---------------------------------|----------------------------|-----------------|-------------------|------------------------|------------------------------|
| | | | | MSPE ⁸ | Exactitud ⁹ | R ₂ ¹⁰ |
| 1 | 2005-2016 (813) | OLS | x | 2.0217, 9.6617 | 91-97% | 0.7122, 0.9923 |
| 2 | 1993-2005 (372) | SVM & BPNN | DBM | x | 90.3% | X |
| 3 | 2015 (143) | RNA | x | 0.03086 | x | 0.84135 |
| 4 | x | RNA | x | 0.997 | x | X |
| 5 | (51) | DT & NB | x | 0.488 | 51.2% | X |
| 6 | 2011-2015 (136) | RNA | x | 0.0014 | 99.86% | X |
| 7 | (437,000) | DT, RF, GBM | DNN | x | 80% | 0.9672 |
| 8 | 2002-2018 | RNA & LR | x | 8.3 | x | X |
| 9 | x | MLs | x | 0.09091 | x | 0.92 |
| 10 | 2003-2016 (139) | MLs | x | 0.1820 | x | X |
| 11 | 2005-2016 (813) | MLs | x | 9.6617 | 97% | 0.9923 |
| 12 | (60,000) | DT, MDT, LightGBM, XGBoost | x | 7.28 | 92% | X |
| 13 | (46) | LR | x | 0.05 | x | 96%, 95% |

Nota 1: El cuadro solamente incluye proyectos de edificación, se excluyen los proyectos de carácter civil.

Nota 2: Adaptado del artículo Machine learning algorithms for construction cost prediction: A systemic review (Abed et al., 2022; p.10).

⁶ Tipos de métodos de predicción aplicados en aprendizaje automático.

⁷ Tipos de métodos de predicción aplicados en aprendizaje profundo.

⁸ Indica el promedio del cuadrado de la diferencia entre los valores originales y los valores predichos (Abed et al.,2022; p.6)

⁹ Indica la relación de las predicciones correctas tanto para verdadera-positiva como para verdadero-negativo en comparación con el número total de casos analizados (Abed et al.,2022; p.7)

¹⁰ Coeficiente de determinación (Abed et al.,2022; p.6)

En esta misma línea los autores Ayinla et al. (2023; p.70) abordan el tema de la implementación del aprendizaje automático y del aprendizaje profundo como herramientas que viene ayudar a la predicción de costos de proyectos de construcción. Por su parte estos hacen un desglose de las 4 ramas del aprendizaje automático que han tenido una mayor injerencia en este campo. La primera es la Red Neuronal Artificial (RNA) que es utilizada para imitar el sistema humano de procesamiento de información, por lo que puede predecir el costo de actividades del proyecto. Este algoritmo ha sido ampliamente estudiado y empleado en la predicción de costos de edificaciones institucionales, costo de los sistemas de pisos compuestos para edificios de varios pisos, entre otros. La mayor limitación de este algoritmo como cualquier otro del aprendizaje automático es contar con una base de datos de costos adecuadas de proyectos anteriores.

Seguidamente se menciona la técnica llamada Razonamiento Basado en Casos (RBC), la cual utiliza información de casos pasados que sean similares para proporcionar una estimación de costos para un proyecto nuevo. Usualmente la información de estos casos se almacena en una base de datos y basado en un porcentaje de similitud da las predicciones. Con este tipo de técnicas existen limitaciones en el sentido de los valores de ponderación bajo los cuales se determina el nivel de similitud; además, en el caso de no encontrarse con otros proyectos similares no se cuenta con información suficiente para realizar la predicción (Ayinla et al., 2023; p.70).

Continuamente, se describe el Algoritmo de Regresión (R), este cuenta con diferentes tipos de algoritmos que pueden realizar predicciones. Este tipo de algoritmos presentan diferentes limitaciones, como, por ejemplo, creen que todo sigue una línea recta, lo cual no es necesariamente cierto para todos los casos, especialmente con datos complejos; aprenden más de la cuenta de los datos, incluyendo los errores, lo que genera que luego no aprendan correctamente con datos nuevos. Luego, al contrario de la limitación anterior, no aprenden lo suficiente de los datos, así que no hacen buenas predicciones ni con los datos conocidos ni con los nuevos. Pueden tener sensibilidad a valores extremos, puede afectar el desempeño si el sistema se encuentra con valores muy grandes o pequeños. Asimismo, podrían extrapolar los datos, no haciendo predicciones fuera del rango de los datos conocidos. En caso de tenerse demasiadas variables relacionadas entre sí, al algoritmo le podría costar hacer buenos cálculos, y, por último, podrían tener dificultad en manejar variables categóricas (Ayinla et al., 2023; p.71).

Finalmente, menciona las Redes Neuronales Profundas (DNNs), las cuales tienen diferentes categorías que pueden realizar funciones distintas. Las Redes Neuronales Convolutiva

(CNN) estiman automáticamente basado en imágenes o planos. Las Redes Neuronales Recurrentes (RNN) se han empleado para el análisis de series temporales en la previsión de costes. Las Redes Generativas Antagónicas (GAN) pueden predecir costes basado en datos históricos. Y, por último, las Redes Transformadoras como ChatGPT, pueden hacer una lectura rápida de especificaciones textuales y descripciones de proyectos que ayudan a automatizar este proceso de la estimación de costos. No obstante, los autores mencionan que el uso de las DNNs es sumamente limitado debido no solo al acceso de la información, sino que también, a que se requiere de personal con alta experiencia que pueda implementar este tipo de tecnologías. Asimismo, no ha sido altamente implementado en la industria y requiere de mucho más experimentación (Ayinla et al., 2023; p.71).

Es evidentemente que hay un alto interés por el sector de la construcción por implementar Inteligencia Artificial en el proceso de estimación de costos de proyectos, debido a la evidencia que existe de los beneficios que esta herramienta ha aportado en otros campos de conocimiento dentro de la gestión de proyectos. Por su parte, siendo BIM una de las metodologías con mayor auge dentro de la construcción, su integración con IA aún se encuentra en etapas iniciales. Muchos de las propuestas de diferentes autores se encuentran en proceso de experimentación, y en casos donde son exitosas, puede que solo apliquen a un pequeño sector de la construcción. Debido a la complejidad de la industria en general, no hay evidencia de aplicaciones en donde una herramienta pueda aportar en todas las fases de estimación, ni en todo tipo de proyectos.

Asimismo, algunas de las conclusiones de los autores, como es el caso de Ayinla et al. (2023; p.71), mencionan que la implementación de aprendizaje automático en la práctica de estimación de costos es aún muy limitada. Esto principalmente por la falta de una base de datos robusta y de calidad que alimente los algoritmos para mejorar la exactitud de las predicciones. Esto es sumamente delicado debido a las implicaciones que un error en los cálculos puede generar en el éxito del proyecto. Mas, no obstante, esta es un área de la Inteligencia Artificial que apenas está iniciando y existe muchas posibilidades de mejora.

De este estudio se puede llegar a diferentes conclusiones, por un lado, se empieza a ver con mayor claridad los beneficios que aportan la integración de BIM con IA para la gestión de costos. Mas, no obstante, este tipo de tecnología (BIM) no es accesible para la mayor parte de los subcontratistas y contratistas medianos y pequeños. Una gran parte de los proyectos, sino que la mayoría, que llegan a licitación, no cuentan con un modelo 3D, y la mayor parte de la información debe de ser extraída manualmente de los planos y las especificaciones técnicas. Esto no limita que

estos subcontratistas y contratistas no puedan gozar de los bienes que la IA puede aportar en la gestión de presupuestos.

De igual forma, los aportes de IA integrado con BIM, se han generado de forma experimental y de forma aislada. Estos solamente cubren una parte del proceso, como, por ejemplo, automatización del desglose de medidas e integración con bases de datos de costos. Sin embargo, aún no se ha generado una tecnología que logre englobar todo el proceso de estimación en una sola aplicación. Por lo que, en estos estudios se enfatiza en la importancia de integrar diferentes tecnologías, con la finalidad de abarcar un alcance más amplio a la vez que se aprovechan las fortalezas de cada una de las partes. Es importante destacar, que en el caso de la metodología BIM, si el modelo no está construido en alto nivel de detalle, este no va a lograr contribuir con información detallada y completa para su uso posterior por parte de IA; debe de existir una estructura y comunicación clara entre diseñadores y estimadores para estar alineados con los requerimientos mínimos a nivel de información que el modelo debe tener.

También, es importante destacar que la mayor parte de los estudios se enfocan en Aprendizaje Automático y Procesos de Lenguaje Natural, siendo el primero el más estudiado, más no hay mucha información respecto a posibles aportes de otras ramas de la IA que podrían mejorar los procesos de estimación de costos. Esto independientemente de si estas se integren o no con BIM. De igual forma, como varios estudios enfatizan, en el caso del aprendizaje automático una la subcategoría de este, aprendizaje profundo, tiene una alta dependencia a bases de datos robustas, actualizadas y de calidad, para que puedan operar de la forma deseada. Lo que podría generar desconfianza por parte de los profesionales en los datos obtenidos de IA, en caso de no contarse con dicha base de datos.

Por último, de la mano con el punto anterior, uno de los objetivos principales de incorporar Inteligencia Artificial en el quehacer de los estimadores es no solo para disminuir los tiempos de creación de presupuestos, sino también, para disminuir el error humano. Sin embargo, estos sistemas aún se encuentran en experimentación y no se cuenta con un sistema de validación de la información aportada tanto IA, como por BIM. Esto con la finalidad de rectificar que los datos estén no solamente correctos, sino que también, se pueda rastrear de forma confiable y transparente el origen de la información de los costos.

1.2 Planteamiento de la hipótesis

A partir del Estado del Arte se denota que el uso de la Inteligencia Artificial como tecnología de proyectos es una realidad actual, mas, no obstante, en la parte de presupuestos para proyectos de construcción la investigación ha arrojado que ésta se encuentra aún en una fase experimental. Los estudios y experimentos desarrollados en el área aportan solamente en una parte del proceso, por lo que no están abordando el presupuesto como una globalidad, siendo ese proceso un indicador crítico para determinar el éxito del proyecto.

Además, es relevante destacar el aporte que IA está generando en otros procesos de la gestión de proyectos de construcción, como, por ejemplo, en la gestión del tiempo, optimizando el uso de los recursos del proyecto a nivel de cronograma. Asimismo, el uso de robots contribuye no solo en un aumento de la seguridad, detectando defectos en estructuras en construcción para poder corregirlas a tiempo; sino también, en la homogenización del trabajo, aportando con la construcción de cierto tipo de actividades, como pintura, que ayuda a dar resultados más consistentes. Por lo que los beneficios que la IA puede generar a la gestión de costos son inevitables.

Cabe destacar que hay un estudio que aporta información sobre beneficios de la IA, pero de esta integrada con BIM en la gestión de diferentes campos de conocimiento. Este estudio, no obstante, se desarrolla de forma general, y no presenta un análisis profundo del impacto de esta integración de tecnologías en la gestión de costos, ni tampoco de su aplicación a la gestión de proyectos de construcción. Igualmente, no hay una especificación de cuales de todas las ramas de IA son las que genera esos beneficios. Por lo que, teniendo un estudio más completo y robusto en este tema, puede aportar en la gestión de proyectos en el sentido de aumentar la precisión de los presupuestos de proyectos de construcción.

Como consecuencia se determina la siguiente pregunta como interrogante de la investigación: ¿En qué grado se está aplicando Inteligencia Artificial en la gestión de estimación de costos en los proyectos de construcción?

Como resultado, se plantea la siguiente hipótesis para la presente investigación: “Si bien el uso de Inteligencia Artificial en la estimación de costos en proyectos de construcción se encuentra en una fase experimental, se parte del supuesto teórico de que su integración podría aportar mejoras significativas en la gestión de proyectos, especialmente en términos de precisión presupuestaria, eficiencia y toma de decisiones. No obstante, este planteamiento se aborda únicamente desde una

perspectiva conceptual y analítica, sin pretender su validación empírica dentro del presente trabajo final de graduación.”

1.3 Objetivos

La presente investigación busca analizar el impacto, las limitaciones y las oportunidades de la Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. A medida que la industria avanza hacia la digitalización, es fundamental comprender cómo estas herramientas pueden optimizar la gestión de costos y cuáles son las barreras que existen para su implementación.

Los objetivos del presente estudio han sido formulados para guiar el análisis de manera estructurada, abordando tanto los beneficios potenciales de la IA como los desafíos que podrían afectar su adopción. A partir de estos objetivos, se espera generar conocimiento relevante que contribuya a una integración más eficiente de estas tecnologías en el sector.

1.3.1 Objetivo general

Proponer una estrategia de integración de la Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, a partir de un diagnóstico teórico y de campo sobre su grado de implementación, los desafíos existentes y beneficios identificados.

1.3.2 Objetivos específicos

- a. Analizar las prácticas actuales de Inteligencia Artificial aplicadas a la elaboración de presupuestos de proyectos de construcción, mediante la revisión documental y el estudio de casos, identificando los niveles de precisión y eficiencia requeridos por la industria, para detectar oportunidades de mejora, establecer criterios de validación y orientar una futura estrategia de implementación.
- b. Analizar las limitaciones técnicas, operativas y culturales que afectan la adopción de herramientas de Inteligencia Artificial en la gestión de costos, a través de una revisión teórica y entrevistas semiestructuradas con profesionales del sector, para identificar las barreras clave y proponer mecanismos que faciliten su integración efectiva en la industria de la construcción.

- c. Extraer lecciones aplicables a la presupuestación a partir de un análisis comparativo entre casos de éxito en la aplicación de Inteligencia Artificial en distintas áreas de la gestión de proyectos de construcción.
- d. Diseñar una propuesta estratégica para la integración de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, que integre una hoja de ruta práctica con estrategias concretas, basado en los hallazgos teóricos y de campo, para orientar su adopción en la industria.

1.4 Alcance y limitaciones

A continuación, se presentan el alcance y las limitaciones del presente proyecto. Esta sección tiene como intención esclarecer los entregables de la presente investigación, así como también, aclarar aquellos aspectos que podrían limitar el cumplimiento de los objetivos de forma parcial, o que podrían influir en el desarrollo de la investigación.

1.4.1 Alcance

El alcance de esta investigación es la evaluar del impacto y los beneficios de la Inteligencia Artificial en el proceso de presupuestación de proyectos de construcción, evaluando su precisión, eficiencia y oportunidades de mejora para satisfacer las necesidades de la industria de la construcción. A partir de este propósito, se analizan las limitaciones actuales, se proponen soluciones prácticas y se desarrollan estrategias de implementación para optimizar la gestión de costos en la industria.

Los resultados de la investigación incluyen un análisis detallado de las aplicaciones actuales de IA, la identificación de barreras para su implementación, el estudio de casos exitosos y la propuesta de un marco de referencia con una hoja de ruta que facilite su adopción en la presupuestación de proyectos de construcción.

A continuación, se detallan los alcances y entregables correspondientes a cada objetivo específico que orienta esta investigación:

- a. **Informe detallado sobre prácticas de IA actuales, destacando su impacto y áreas de oportunidad:** Este informe sintetizó las prácticas actuales de Inteligencia Artificial

aplicadas en la presupuestación de proyectos de construcción, evaluando su impacto en la precisión y eficiencia del proceso. Este documento cubrió los siguientes contenidos:

- Un análisis de las herramientas tecnológicas de IA disponibles en el mercado aplicables en la presupuestación, clasificándolas según su funcionalidad y nivel de adopción en la industria.
- La identificación de los beneficios y desafíos que estas herramientas presentan en el proceso de estimación de costos.
- Un estudio sobre cómo estas tecnologías están respondiendo a las necesidades del sector de la construcción.
- Un mapeo de las áreas de oportunidad para el desarrollo y mejora de la IA en la presupuestación, considerando limitaciones actuales y posibles innovaciones.

b. Análisis de limitaciones que presentan las herramientas de IA en la presupuestación:

Informe detallado que identificó y analizó las principales limitaciones de las herramientas de IA en la gestión de costos de proyectos de construcción.

- Factores técnicos: evaluación de la precisión y confiabilidad de los algoritmos de IA utilizados en presupuestación.
- Factores operativos: análisis de los desafíos en la integración de IA con los procesos tradicionales de presupuestación.
- Factores culturales: estudio de la resistencia al cambio dentro de la industria y su impacto en la adopción de IA.
- Ejemplos y casos de estudio que ilustren cómo estas limitaciones han afectado la implementación de IA y qué estrategias se han utilizado para superarlas.

c. Informe de análisis comparativo de casos de éxito en la aplicación de Inteligencia

Artificial en la gestión de proyectos de construcción: Análisis de casos de éxito en la aplicación de IA en diversas áreas de la gestión de proyectos de construcción.

- Áreas de oportunidad para mejorar la adopción de IA en la presupuestación de proyectos de construcción.
- Buenas prácticas extraídas de los casos de éxito analizados y su aplicabilidad en el ámbito presupuestario.

- Informe detallado que sintetiza los hallazgos y proporciona recomendaciones para la optimización del uso de IA en la gestión de costos.
- d. Marco de referencia con una propuesta de hoja de ruta para la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción:** Compilación de hallazgos sobre los beneficios, limitaciones y oportunidades de la IA en la presupuestación de proyectos de construcción.
- Marco conceptual y práctico que permita comprender la aplicación de IA en la industria de la construcción.
 - Propuesta estructurada que establezca lineamientos clave para la adopción de IA en la presupuestación, considerando factores técnicos, operativos y culturales.
 - Estrategias de gestión de proyectos que faciliten la adopción de IA, abordando desde la selección de herramientas hasta su integración en los procesos existentes.
 - Pasos clave para la implementación progresiva de IA en la gestión de costos, considerando desafíos operativos, técnicos y culturales.
 - Guía detallada para que futuros profesionales puedan aplicar estas estrategias de manera efectiva, maximizando el impacto positivo en la industria de la construcción.

1.4.2 Limitaciones

En esta sección se describen las limitaciones que afectaron el desarrollo de la investigación. Aunque el estudio se enfocará en un análisis teórico y en la revisión de casos existentes sobre el uso de la inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, hay ciertos factores que podrían restringir el acceso a información clave o influir en la profundidad del análisis. Es importante tener en cuenta estas limitaciones al momento de interpretar los hallazgos y las recomendaciones del estudio. Las limitaciones son las siguientes:

- **Enfoque teórico, revisión de casos existentes y trabajo de campo con expertos:** La investigación estará limitada a un análisis teórico, de revisión de casos previos documentados sobre la aplicación de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción y, también, a un trabajo de campo con expertos. Por lo

tanto, no se desarrollarán pruebas experimentales ni se implementarán herramientas de IA en proyectos reales. Esto limita la capacidad de evaluar la efectividad de las estrategias propuestas en condiciones prácticas.

- **Disponibilidad de expertos y fuentes de información especializadas:** La investigación experimentó dificultades para acceder a expertos o fuentes especializadas en el tema. La falta de entrevistas con profesionales clave o la limitada disponibilidad de testimonios podría restringir la profundidad del análisis y la identificación de lecciones prácticas aplicables.
- **Desafíos en la recolección de datos actualizados sobre tecnologías de IA:** Dado que las tecnologías de IA están en constante evolución, lo que es relevante el día de hoy podría no ser relevante en unos meses o inclusive semanas. Por consiguiente, se ve limitada la capacidad de la presente investigación para reflejar los avances más recientes en IA aplicados a la presupuestación de proyectos de construcción, en el sentido de que la propuesta de la investigación podría no tener validez en un futuro cercano o podría carecer de información relevante.
- **Diversidad en las prácticas y enfoques de implementación de IA:** La implementación de IA en la construcción puede variar según el tipo de proyecto, el tamaño de la organización y la ubicación geográfica. Esta diversidad puede dificultar la generalización de los resultados y limitar la aplicabilidad universal de las recomendaciones generadas en la investigación.
- **Limitación de validación empírica de la propuesta:** Asimismo, es importante señalar que, debido a las características propias del proyecto y las limitaciones de tiempo establecidas para su desarrollo, no será posible realizar una aplicación práctica de la propuesta en una empresa real. En consecuencia, los resultados obtenidos y la hoja de ruta planteada se presentan como una aproximación teórica y metodológica que podrá servir de base para futuras investigaciones o implementaciones en entornos organizacionales.

Capítulo 2 Marco teórico

El presente capítulo de investigación proporciona los fundamentos conceptuales necesarios para comprender el impacto de la inteligencia artificial en la gestión de presupuestos en proyectos de construcción. Como resultado, el costo es uno de los factores críticos en la gestión de proyectos, y es fundamental analizar cómo se gestiona tradicionalmente, qué desafíos enfrenta la industria en este aspecto y cómo las nuevas tecnologías pueden optimizar este proceso. Para ello, se explorará en primer lugar lo que significa la gestión de costos en proyectos, el papel del presupuesto como un factor clave dentro del ciclo de vida, los beneficios y desafíos en la gestión de mismo y la relevancia de una correcta administración de este para el éxito del proyecto.

Posteriormente, se analizará el concepto de Inteligencia Artificial, su impacto en la gestión de proyectos y su respectivo rol dentro de la gestión de presupuestos de construcción, identificando sus beneficios, limitaciones y el grado de adopción en la industria. Finalmente, se profundizará en la integración de estas herramientas en la gestión de presupuestos en proyectos de construcción, examinando su impacto en la precisión de las estimaciones, la eficiencia en la toma de decisiones y la reducción de riesgos. Este marco teórico servirá como base para el análisis de campo y permitirá contextualizar los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación.

2.1 Gestión del costo en proyectos de construcción

A como se va a detallar en las secciones siguientes, la gestión del costo es una parte clave dentro de cualquier proyecto, especialmente en el sector construcción, donde los cambios, imprevistos y complejidad técnica están siempre presentes. Hablar de gestión del costo no es solo pensar en cuánto se va a gastar, sino en cómo se planean, estiman, controlan y ajustan los recursos financieros a lo largo de todo el proyecto.

Cuando se hace bien, permite tomar decisiones más acertadas, responder a tiempo ante desviaciones, y mantener la rentabilidad del proyecto. Además, no se trata únicamente de números: detrás de una buena gestión de costos hay planificación, análisis, herramientas y mucha coordinación con otras áreas como cronograma, adquisiciones o alcance.

En esta sección se revisan los conceptos básicos que dan forma a esta práctica: qué significa realmente gestionar los costos, cómo se construye un presupuesto y por qué es considerado una herramienta estratégica, y qué beneficios concretos se pueden lograr cuando se aplica bien desde el inicio del proyecto.

2.1.1 Conceptualización de la gestión de costos

Como mencionan los autores Bardu & Sandu, (2020, p.216) *“Muchos proyectos comienzan con un gran concepto, enorme gasto y enorme lucha. Una contribución al fracaso de los proyectos es la falta de comprensión del campo, tiempo, costo y calidad”*. Por lo que en el presente apartado se va a centrar en la comprensión de los principales conceptos alrededor de la gestión de costos en proyectos de construcción.

La gestión de costos en proyectos es un componente fundamental para garantizar el uso eficiente de los recursos financieros y el cumplimiento de los objetivos presupuestarios. Por lo que, comprender sus componentes permite una mejor planificación y control a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Según el Project Management Institute (2017) la gestión de los costos se define como *“(…) los procesos involucrados en planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos de modo que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado”* (p. 231). Por su parte, cada uno de estos procesos se definen de la siguiente manera (p.231):

- **Planificar la gestión de los costos:** *“Es el proceso de definir cómo se han de estimar, presupuestar, gestionar, monitorear y controlar los costos del proyecto”*.
- **Estimar los costos:** *“Es el proceso de desarrollar una aproximación de los recursos monetarios necesarios para completar el trabajo del proyecto”*.
- **Determinar el presupuesto:** *“Es el proceso que consiste en sumar los costos estimados de las actividades individuales o paquetes de trabajo para establecer una línea base de costos autorizada”*.
- **Controlar los costos:** *“Es el proceso de monitorear el estado del proyecto para actualizar los costos del proyecto y gestionar cambios a la línea base de costos”*.

Cada uno de estos procesos cumple una función específica dentro del ciclo de vida del proyecto, como esclarecen los autores Project Management Institute, (2017; p.25), estos se encuentran con mayor presencia en el grupo de procesos de Planificación y de Monitoreo y Control, sin embargo, se relacionan entre sí con los demás procesos para asegurar que el control financiero no se limite solo a registrar gastos, sino que sirva como guía para tomar decisiones estratégicas.

Tomando esto en consideración, uno de los conceptos más importantes dentro de esta gestión es la línea base de costos. Esta representa el presupuesto aprobado más cualquier reserva

para contingencias, y se convierte en el punto de referencia contra el cual se mide el desempeño real del proyecto (Project Management Institute, 2017; p.254). Como resultado, tener una línea base bien definida permite hacer seguimiento efectivo, identificar desviaciones y corregir el rumbo si es necesario.

La gestión de costos no opera de manera aislada; está intrínsecamente vinculada con otros aspectos clave del proyecto, como el alcance, el cronograma y las adquisiciones. Un cambio en el alcance puede afectar directamente la estimación de costos y requerir ajustes en el presupuesto y en la línea base del proyecto. Esta interdependencia es fundamental para mantener el proyecto alineado con sus objetivos financieros y temporales (Villegas & Rincón de Parra, 2011; p.86).

El control continuo de costos es esencial para detectar desviaciones a tiempo y tomar decisiones correctivas, como ajustar el alcance, renegociar con proveedores o modificar la secuencia de ejecución. En la industria de la construcción, donde los precios de los materiales y la disponibilidad de recursos pueden variar repentinamente, este control es aún más crítico para garantizar la viabilidad financiera del proyecto (Gutiérrez et al., 2023).

Una gestión de costos efectiva no solo protege el margen financiero de la empresa, sino que también genera confianza entre los clientes y demás interesados del proyecto. Demostrar que los recursos se utilizan de manera eficiente y que se pueden anticipar y mitigar impactos financieros es clave para el éxito y la reputación en el sector de la construcción.

2.1.2 El presupuesto como herramienta estratégica

Haber definido los fundamentos de la gestión de costos permite ahora profundizar en una de sus herramientas más relevantes: el presupuesto. Si bien es parte del proceso global de planificación y control, el presupuesto por sí solo cumple una función estratégica dentro del proyecto. Según Project Management Institute (2017; p.248) “*Determinar el presupuesto es el proceso que consiste en sumar los costos estimados de las actividades individuales o paquetes de trabajo para establecer una línea base de costos autorizada*”. En el sector construcción, donde hay múltiples variables en juego, el presupuesto se convierte en una herramienta clave para anticipar, planificar y tomar decisiones con mayor seguridad.

La consolidación del presupuesto genera una línea base que, como se explicó anteriormente, actúa como referencia para medir el desempeño financiero del proyecto. Su valor estratégico radica en que no solo permite comparar, sino también detectar desviaciones a tiempo,

anticiparse a posibles sobrecostos y generar escenarios de ajuste si las condiciones cambian (Project Management Institute, 2017; p.257).

Esta línea base no debe verse como algo estático: requiere seguimiento constante y está estrechamente vinculada con otros componentes del proyecto como el cronograma, el alcance, las adquisiciones y los riesgos. En la práctica, un cambio en el alcance puede generar nuevos requerimientos y ajustes de precios; un retraso puede significar costos adicionales. Por eso, el presupuesto no puede gestionarse de forma aislada, y debe mantenerse alineado con las demás áreas del plan del proyecto (Guzmán Sánchez, 2023)

Además, el presupuesto cumple una función esencial como herramienta de comunicación. Presentar de forma clara cuánto costará ejecutar el proyecto y cuándo se necesitarán los recursos permite generar confianza con clientes, proveedores y el equipo interno. También facilita la defensa técnica de decisiones, especialmente cuando surgen cambios o desviaciones.

Tradicionalmente, se ha entendido que el éxito de un proyecto depende de cumplir con el alcance, el tiempo y el costo. Esta relación se conoce como el triángulo de hierro, donde cualquier cambio en uno de estos elementos afecta inevitablemente a los otros. Sin embargo, esa mirada ha ido evolucionando. Hoy también se consideran factores como la satisfacción del cliente, la calidad del producto entregado o el valor estratégico del proyecto para la organización (Caccamese & Bragantini, 2012). A pesar de esa evolución, el costo sigue siendo uno de los indicadores más consistentes. Estudios recientes, como el de Aa et al. (2018; p.6), confirman que, independientemente del tipo de industria, el presupuesto sigue siendo un criterio clave en la evaluación del éxito de un proyecto.

Otro punto importante es que el presupuesto no solo sirve para controlar y comparar, sino que también aporta datos valiosos para la toma de decisiones a lo largo del proyecto. En contextos como la construcción, donde los precios de materiales pueden cambiar rápidamente o surgen imprevistos en obra, tener una línea base clara permite actuar a tiempo. A su vez, comparar los datos reales con los presupuestados permite identificar patrones, ajustar procesos y mejorar la precisión en futuros proyectos (Gutiérrez et al., 2023; p.74).

Finalmente, si bien el presupuesto cumple un rol estratégico como herramienta de planificación, seguimiento y comunicación, su utilidad depende en gran medida de la calidad de la información que lo compone. Para que sirva realmente como base para tomar decisiones, es importante que las estimaciones estén construidas con criterios técnicos que consideren el rango

posible de variación, así como niveles aceptables de exactitud y precisión en función del tipo de proyecto. También es clave contar con un grado de confianza que permita justificar el uso de esos datos ante los diferentes interesados (estos conceptos se desarrollan en la sección 2.5.3). Incorporar estos elementos no solo fortalece la credibilidad del presupuesto, sino que también permite usarlo como una herramienta más robusta y alineada con una toma de decisiones bien informada. Más adelante, estos conceptos se retomarán al analizar cómo se validan los resultados generados por modelos automatizados de estimación, como los que utilizan inteligencia artificial.

2.1.3 Beneficios clave de una adecuada gestión de costos

Tal como se vio en la sección anterior, el presupuesto es una herramienta estratégica dentro del proceso de gestión de costos. No obstante, cuando esta gestión se aplica de forma integral, los beneficios se amplían significativamente, impactando no solo el desempeño financiero del proyecto, sino también su planificación, ejecución y sostenibilidad. Este apartado presenta los principales beneficios teóricos y prácticos que la literatura identifica como resultado de una adecuada gestión del costo en proyectos, particularmente en el sector construcción.

Uno de los beneficios más reconocidos es la optimización del uso de los recursos. La gestión de costos permite planificar de manera precisa qué recursos serán necesarios, cuándo y en qué cantidad. Esto ayuda a evitar gastos innecesarios, reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia en la asignación del presupuesto aprobado. Como señalan Okereke et al., (2022b), una planificación económica clara permite que los recursos sean utilizados de forma coherente con los objetivos del proyecto, generando mayor valor con los mismos insumos. Además, en proyectos complejos, esta optimización se traduce en menores tiempos de ejecución y reducción de los riesgos financieros asociados a malas decisiones presupuestarias.

Otro beneficio importante es la toma de decisiones basada en datos concretos. Una buena gestión de costos implica el establecimiento de una línea base contra la cual se mide el desempeño financiero del proyecto, como se mencionó en la sección anterior. Por lo tanto, esto permite identificar desviaciones a tiempo y tomar decisiones fundamentadas, en lugar de actuar de forma reactiva. Según Okereke et al. (2022c; p.20-39), las prácticas de gestión de costos no solo permiten controlar los gastos del proyecto, sino que también impactan en el rendimiento estratégico de las organizaciones constructoras, facilitando decisiones financieras más informadas y alineadas con los objetivos empresariales.

Asimismo, la gestión de costos facilita una coordinación más eficiente entre las diferentes áreas del proyecto. Al estar relacionada directamente con el cronograma, el alcance y las adquisiciones, cualquier modificación en uno de estos componentes debe reflejarse en el presupuesto. Esto obliga a una comunicación constante entre las partes involucradas y reduce el riesgo de conflictos internos por falta de alineación. Okereke et al. (2022c; p.21), las prácticas sólidas de gestión de costos contribuyen a una mejor coordinación entre las áreas funcionales, disminuyendo fricciones internas y mejorando la coherencia entre lo planificado y lo ejecutado.

Desde una perspectiva estratégica, la gestión de costos también fortalece la transparencia y la rendición de cuentas. Contar con reportes claros sobre el avance del presupuesto, el uso de reservas y las desviaciones generadas permite responder tanto al cliente como a otros actores del proyecto. La Iniciativa de Transparencia en Infraestructura (2018) destaca que la implementación de principios y directrices en la construcción pública mejora la transparencia y la rendición de cuentas, elementos esenciales para generar confianza entre las partes interesadas.

En un sentido más amplio, una gestión de costos sólida puede convertirse en un factor estratégico de sostenibilidad económica y reputacional para las organizaciones. Las empresas que aplican metodologías rigurosas de control financiero son percibidas como más confiables, lo que mejora su posicionamiento competitivo, facilita su participación en procesos de licitación y fortalece su imagen ante posibles socios estratégicos. Según Gómez-Valdés et al. (2023, p.75), este tipo de prácticas contribuyen directamente a mejorar la percepción del cliente, optimizar recursos y fortalecer la competitividad del proyecto y de la organización en su conjunto.

Además, la gestión de costos tiene un impacto directo en la formación del equipo y el aprendizaje organizacional. Analizar los resultados presupuestarios al cierre de un proyecto permite extraer lecciones aprendidas, identificar patrones de desviación, documentar errores comunes y construir bases históricas más robustas. Esta retroalimentación alimenta procesos de mejora continua y fortalece las capacidades del equipo en la planificación y control de futuros proyectos. Este tipo de prácticas consolida una cultura organizacional basada en el conocimiento, la eficiencia y el control proactivo (Kerzner, 2017; p.978).

Finalmente, algunos autores han vinculado los beneficios de la gestión de costos con una mayor madurez organizacional en dirección de proyectos. Cuando las organizaciones adoptan prácticas de gestión de costos bien estructuradas, no solo logran entregar proyectos con mayor eficiencia, sino que también desarrollan capacidades internas que mejoran la toma de decisiones

estratégicas, fortalecen su cultura organizacional y elevan su nivel de profesionalización en la gestión de proyectos (Aa et al., 2018; p.2).

En síntesis, los beneficios de una buena gestión de costos no se limitan a mantener los gastos bajo control. Aportan valor a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, fortalecen la coordinación interna, optimizan recursos, permiten actuar con datos y mejoran la confianza con los interesados. Esta práctica, cuando se integra de forma transversal y sistemática, se convierte en un factor clave para alcanzar los objetivos técnicos, financieros y estratégicos de cualquier organización que ejecute proyectos.

2.2 Teoría de estimación de costos de proyectos de construcción

Una vez establecida la relevancia de la gestión de costos dentro del ciclo de vida del proyecto, es necesario profundizar en el papel que cumple el presupuesto como herramienta estratégica. El presupuesto no solo orienta las decisiones financieras y operativas, sino que también actúa como una guía de referencia para la asignación de recursos, el seguimiento del desempeño y la toma de decisiones.

Esta sección analiza el presupuesto desde una perspectiva funcional, destacando su influencia en la viabilidad del proyecto, su alineación con los objetivos organizacionales y su potencial como insumo clave en sistemas de apoyo a decisiones. Este enfoque permitirá posteriormente identificar de qué manera los avances tecnológicos pueden mejorar su elaboración y precisión.

Comprender las características, niveles y métodos de estimación permite no solo aplicar técnicas apropiadas según el momento del proyecto, sino también interpretar correctamente el grado de confiabilidad de los datos disponibles. Esta capacidad de anticipación financiera es crítica para asegurar una asignación eficiente de recursos, reducir riesgos y establecer expectativas realistas desde el inicio. A continuación, se desarrolla el marco teórico que sustenta el proceso de estimación, partiendo de sus niveles de definición y continuando con los métodos tradicionales utilizados en el sector construcción.

2.2.1 Tipos y niveles de estimación

La estimación de costos no es un proceso estático ni único, por el contrario, se trata de una actividad progresiva que acompaña el avance del proyecto desde sus fases iniciales hasta la

definición detallada del alcance y las especificaciones. A medida que se dispone de más información técnica y de contexto, las estimaciones se van ajustando y refinando para reducir la incertidumbre asociada al cálculo de costos.

Según el Project Management Institute (2017; p.241), se reconocen tres niveles principales de estimación: la estimación de orden de magnitud, la estimación aproximada y la estimación detallada. Estas se definen de la siguiente manera:

1. **Estimación de orden de magnitud:** se elabora en etapas iniciales, cuando apenas existe una idea general del alcance, y presenta un rango de precisión amplio, entre -25 % y +75 %. Se utiliza generalmente para análisis de factibilidad y toma de decisiones estratégicas en fases tempranas.
2. **Estimación aproximada:** a medida que se cuenta con mayor definición en los diseños y datos técnicos, se puede pasar a una estimación aproximada o preliminar, que permite tomar decisiones intermedias, como asignaciones presupuestarias o análisis comparativos. Su precisión se sitúa normalmente entre -15 % y +30 %.
3. **Estimación detallada:** finalmente, una vez que el proyecto alcanza una madurez suficiente en sus planos, especificaciones y planificación detallada, se elabora la estimación detallada, que es la base directa para el presupuesto oficial. Esta presenta el nivel más alto de exactitud, con un rango de variación entre -5 % y +10 %, siempre que se cuente con información confiable y completa.

Este enfoque progresivo es particularmente importante en la construcción, ya que muchos proyectos se desarrollan bajo condiciones de incertidumbre, ya sea por limitaciones en los estudios previos, restricciones contractuales o cronogramas acelerados. Identificar correctamente el tipo de estimación utilizada, y comunicar su grado de precisión, permite establecer expectativas realistas y evita que los datos preliminares se interpreten como cifras definitivas.

Otro aspecto clave a considerar es el nivel de confianza o fiabilidad estadística asociado a la estimación. Aunque dos estimaciones puedan presentar rangos similares de precisión, su nivel de confianza puede variar significativamente en función del origen de los datos, la experiencia del estimador o la complejidad del proyecto. Toda estimación debería acompañarse de un análisis que indique su margen de error y nivel de certidumbre, de modo que pueda utilizarse responsablemente como base para decisiones financieras (Blocher et al., 2010; p.174).

Además, en proyectos complejos es común utilizar un enfoque de estimación por fases o *rolling wave*, donde las actividades a corto plazo se estiman con mayor precisión, mientras que las fases futuras se estiman de manera preliminar y se van actualizando a medida que el diseño avanza. Esta técnica permite mantener una visión financiera realista sin retrasar la planificación (Kerzner, 2017; p.533).

2.2.2 Métodos tradicionales de estimación de costos

Una vez determinado el nivel de definición del proyecto y el tipo de estimación requerido, corresponde seleccionar el método más adecuado para calcular los costos. Existen diversos enfoques metodológicos, cada uno con ventajas y limitaciones que deben ser valoradas según la etapa del proyecto, el tiempo disponible y la calidad de la información con la que se cuenta. En el Cuadro 2.1. se muestran los métodos tradicionales de estimación de costos que detalla el *Project Management Institute* (2017; p.234-244).

Cuadro 2.1. Métodos tradicionales de estimación de costos.

| Método de estimación | Descripción | Ventajas principales | Limitaciones clave |
|--|---|---|--|
| Análogo (Kerzner, 2017) | Utiliza datos históricos de proyectos similares para estimar el costo del actual. Requiere juicio experto para ajustar las diferencias entre proyectos. | Rápida, económica, útil en etapas tempranas. | Menor precisión, depende de la similitud entre proyectos y calidad del dato. |
| Paramétrica | Usa relaciones matemáticas entre parámetros del proyecto (ej. costo por m ²) y los resultados históricos para estimar costos. | Mayor precisión si se tienen datos sólidos; replicable. | Requiere modelos y bases de datos confiables. |
| Estimación ascendente (Bottom-up) | Descompone el proyecto en componentes o paquetes de trabajo y estima cada uno por separado para luego agregarlos. | Alta precisión, trazabilidad clara. | Alto consumo de tiempo y recursos; requiere información detallada. |
| Juicio experto | Basado en la experiencia de profesionales calificados, aplicable cuando no hay suficiente información objetiva. | Útil ante incertidumbre; se adapta a distintos contextos. | Subjetiva; debe complementarse con otros métodos. |

| Método de estimación | Descripción | Ventajas principales | Limitaciones clave |
|------------------------------------|---|---|--|
| Estimación por tres valores | Calcula un promedio ponderado usando tres escenarios: optimista (O), más probable (M) y pesimista (P), generalmente aplicando la fórmula PERT: $(O + 4M + P)/6$. | Ayuda a manejar la incertidumbre y variabilidad; promueve el análisis de riesgos. | Requiere estimaciones confiables para los tres escenarios; puede ser subjetiva |

Nota: Adaptado de *Project Management Institute* (2017; p.234-244).

Cabe destacar que la selección del método no solo depende del momento del proyecto, sino también de la disponibilidad de recursos internos. En organizaciones con bases de datos históricas consolidadas, es más factible implementar métodos paramétricos o híbridos. Por el contrario, en contextos donde el conocimiento se encuentra disperso o reside únicamente en personas clave, se recurre con mayor frecuencia al juicio experto o a modelos análogos (Desconocido, 2023).

Por esta razón, muchas organizaciones desarrollan sistemas propios de estimación, adaptados a su tipo de proyectos, capacidad técnica y enfoque estratégico. Estos sistemas pueden incluir márgenes estándar de contingencia, fórmulas de ajuste para condiciones específicas (como proyectos en zonas rurales o urbanas), o bases de datos con rendimientos promedio por actividad. Si bien no sustituyen la experiencia del estimador, sí permiten reducir la variabilidad y aumentar la trazabilidad de los resultados.

En la práctica, estos métodos no se utilizan de forma aislada, sino que se combinan para generar estimaciones más robustas. Por ejemplo, puede realizarse una estimación análoga para validar los resultados de una bottom-up, o utilizar juicio experto para ajustar una fórmula paramétrica. El Cuadro 2.1 incluido en esta tesis resume estos métodos y puede ser utilizado como referencia al momento de seleccionar la estrategia de estimación más apropiada para un proyecto específico.

2.2.3 Herramientas tradicionales utilizadas en la estimación de costos

Una vez definidos los niveles de estimación y los métodos disponibles, el siguiente paso en el proceso consiste en la selección e implementación de herramientas que permitan llevar a cabo la estimación con la precisión, trazabilidad y eficiencia requeridas. En el contexto de la industria de la construcción, donde se manejan múltiples partidas, proveedores, condiciones contractuales y riesgos, contar con herramientas adecuadas no solo agiliza el trabajo del estimador, sino que también facilita la documentación y validación de los resultados.

Tradicionalmente, uno de los instrumentos más utilizados es la hoja de cálculo, generalmente en Excel, debido a su flexibilidad y capacidad para adaptarse a cualquier tipo de proyecto. Este tipo de herramienta permite organizar bases de datos de precios, generar fórmulas personalizadas, aplicar porcentajes de contingencia y consolidar resúmenes de costos. Sin embargo, su dependencia del usuario también representa una desventaja. Como advierte Mitrtech, el uso de herramientas manuales sin una gestión adecuada puede derivar en errores no detectados, duplicación de conceptos o pérdida de trazabilidad, especialmente cuando se trabaja con múltiples archivos sin un control de versiones efectivo (Mitrtech, s.f.).

Además de las hojas de cálculo, muchas empresas recurren a bases de datos de costos unitarios, como catálogos de precios regionales o por sector. Estas herramientas permiten al estimador seleccionar insumos y rendimientos promedio por actividad, ajustándolos mediante factores como la ubicación, las condiciones de obra o la experiencia previa. Algunos de estos catálogos están disponibles en formato digital e incluso integrados en software especializado como Presto, CostOS, *Sage Estimating* y S10, los cuales permiten importar bases de datos, vincular información con cronogramas, generar reportes personalizados y realizar análisis comparativos entre estimaciones previas y reales (CostOS, s.f.; Presto, s.f.; S10 Perú, s.f.; Sage Estimating, s.f.).

Asimismo, plataformas como *PlanSwift* han ganado popularidad por su capacidad de realizar *take-offs* digitales directamente sobre planos en PDF o CAD. Este tipo de software mejora la precisión de la medición, reduce los tiempos de cuantificación y minimiza los errores derivados del procesamiento manual. Además, permite vincular las mediciones con análisis de precios unitarios, automatizando buena parte del flujo de trabajo del estimador (PlanSwift., s.f.).

En años recientes, herramientas más avanzadas como el *Building Information Modeling* han comenzado a integrarse a los procesos de estimación, particularmente en empresas que buscan mayor trazabilidad y precisión. A través de modelos tridimensionales enriquecidos con datos (modelos 5D), es posible vincular automáticamente los elementos constructivos con las bases de precios y actualizar los presupuestos en tiempo real ante cualquier cambio en el diseño. Como señala Gómez-Valdés et al. (2023), la adopción de estas plataformas ha tenido un impacto positivo en la gestión de proyectos, aunque requiere una curva de aprendizaje significativa, inversión inicial considerable y personal especializado (Gómez-Valdés et al., 2023; p.75).

Finalmente, es importante reconocer que muchas pequeñas y medianas empresas continúan utilizando herramientas más tradicionales, no por falta de interés en la modernización, sino por

limitaciones presupuestarias, resistencia al cambio o falta de personal capacitado. Esto no invalida su uso, pero sí requiere procedimientos internos más rigurosos, validación cruzada de datos y documentación clara que respalde las decisiones estimativas.

En conclusión, las herramientas tradicionales utilizadas para la estimación de costos en construcción han evolucionado desde soluciones manuales y flexibles como Excel, hasta plataformas especializadas con capacidades integradas. La selección de la herramienta adecuada depende no solo del tipo de proyecto y la etapa en la que se encuentra, sino también de los recursos disponibles, la cultura organizacional y la estrategia de gestión adoptada. Entender las capacidades y limitaciones de estas herramientas es esencial para garantizar la coherencia, trazabilidad y utilidad de la información generada en esta fase crítica de la gestión del proyecto.

2.2.4 Desafíos frecuentes en la estimación de costos de construcción

Una vez definidos los niveles de estimación y los métodos disponibles, el siguiente paso en el proceso consiste en la selección e implementación de herramientas que permitan llevar a cabo la estimación con la precisión, trazabilidad y eficiencia requeridas. En el contexto de la industria de la construcción, donde se manejan múltiples partidas, proveedores, condiciones contractuales y riesgos, contar con herramientas adecuadas no solo agiliza el trabajo del estimador, sino que también facilita la documentación y validación de los resultados.

Tradicionalmente, uno de los instrumentos más utilizados es la hoja de cálculo, generalmente en Excel, debido a su flexibilidad y capacidad para adaptarse a cualquier tipo de proyecto. Este tipo de herramienta permite organizar bases de datos de precios, generar fórmulas personalizadas, aplicar porcentajes de contingencia y consolidar resúmenes de costos. Sin embargo, su dependencia del usuario también representa una desventaja. Como advierte Mitrtech, el uso de herramientas manuales sin una gestión adecuada puede derivar en errores no detectados, duplicación de conceptos o pérdida de trazabilidad, especialmente cuando se trabaja con múltiples archivos sin un control de versiones efectivo (Mitrtech, s.f.).

Además de las hojas de cálculo, muchas empresas recurren a bases de datos de costos unitarios, como catálogos de precios regionales o por sector. Estas herramientas permiten al estimador seleccionar insumos y rendimientos promedio por actividad, ajustándolos mediante factores como la ubicación, las condiciones de obra o la experiencia previa. Algunos de estos catálogos están disponibles en formato digital e incluso integrados en software especializado como

Presto, CostOS, Sage Estimating y S10, los cuales permiten importar bases de datos, vincular información con cronogramas, generar reportes personalizados y realizar análisis comparativos entre estimaciones previas y reales (CostOS, s.f.; Presto, s.f.; S10 Perú, s.f.; Sage Estimating, s.f.).

Asimismo, plataformas como PlanSwift han ganado popularidad por su capacidad de realizar *take-offs* digitales directamente sobre planos en PDF o CAD. Este tipo de software mejora la precisión de la medición, reduce los tiempos de cuantificación y minimiza los errores derivados del procesamiento manual. Además, permite vincular las mediciones con análisis de precios unitarios, automatizando buena parte del flujo de trabajo del estimador (PlanSwift., s.f.).

En años recientes, herramientas más avanzadas como el *Building Information Modeling* han comenzado a integrarse a los procesos de estimación, particularmente en empresas que buscan mayor trazabilidad y precisión. A través de modelos tridimensionales enriquecidos con datos (modelos 5D), es posible vincular automáticamente los elementos constructivos con las bases de precios y actualizar los presupuestos en tiempo real ante cualquier cambio en el diseño. Como señala Gómez-Valdés et al. (2023), la adopción de estas plataformas ha tenido un impacto positivo en la gestión de proyectos, aunque requiere una curva de aprendizaje significativa, inversión inicial considerable y personal especializado (Gómez-Valdés et al., 2023; p.75).

Finalmente, es importante reconocer que muchas pequeñas y medianas empresas continúan utilizando herramientas más tradicionales, no por falta de interés en la modernización, sino por limitaciones presupuestarias, resistencia al cambio o falta de personal capacitado. Esto no invalida su uso, pero sí requiere procedimientos internos más rigurosos, validación cruzada de datos y documentación clara que respalde las decisiones estimativas.

En conclusión, las herramientas tradicionales utilizadas para la estimación de costos en construcción han evolucionado desde soluciones manuales y flexibles como Excel, hasta plataformas especializadas con capacidades integradas. La selección de la herramienta adecuada depende no solo del tipo de proyecto y la etapa en la que se encuentra, sino también de los recursos disponibles, la cultura organizacional y la estrategia de gestión adoptada. Entender las capacidades y limitaciones de estas herramientas es esencial para garantizar la coherencia, trazabilidad y utilidad de la información generada en esta fase crítica de la gestión del proyecto.

2.2.5 Criterios de validación en la estimación de costos

Una vez definidos los niveles de estimación y los métodos disponibles, el siguiente paso en el proceso consiste en la selección e implementación de herramientas que permitan llevar a cabo la estimación con la precisión, trazabilidad y eficiencia requeridas. En el contexto de la industria de la construcción, donde se manejan múltiples partidas, proveedores, condiciones contractuales y riesgos, contar con herramientas adecuadas no solo agiliza el trabajo del estimador, sino que también facilita la documentación y validación de los resultados.

Tradicionalmente, uno de los instrumentos más utilizados es la hoja de cálculo, generalmente en Excel, debido a su flexibilidad y capacidad para adaptarse a cualquier tipo de proyecto. Este tipo de herramienta permite organizar bases de datos de precios, generar fórmulas personalizadas, aplicar porcentajes de contingencia y consolidar resúmenes de costos. Sin embargo, su dependencia del usuario también representa una desventaja. Como advierte Mitrtech, el uso de herramientas manuales sin una gestión adecuada puede derivar en errores no detectados, duplicación de conceptos o pérdida de trazabilidad, especialmente cuando se trabaja con múltiples archivos sin un control de versiones efectivo (Mitrtech, s.f.).

Además de las hojas de cálculo, muchas empresas recurren a bases de datos de costos unitarios, como catálogos de precios regionales o por sector. Estas herramientas permiten al estimador seleccionar insumos y rendimientos promedio por actividad, ajustándolos mediante factores como la ubicación, las condiciones de obra o la experiencia previa. Algunos de estos catálogos están disponibles en formato digital e incluso integrados en software especializado como Presto, CostOS, Sage Estimating y S10, los cuales permiten importar bases de datos, vincular información con cronogramas, generar reportes personalizados y realizar análisis comparativos entre estimaciones previas y reales (CostOS, s.f.; Presto, s.f.; S10 Perú, s.f.; Sage Estimating, s.f.).

Asimismo, plataformas como PlanSwift han ganado popularidad por su capacidad de realizar *take-offs* digitales directamente sobre planos en PDF o CAD. Este tipo de software mejora la precisión de la medición, reduce los tiempos de cuantificación y minimiza los errores derivados del procesamiento manual. Además, permite vincular las mediciones con análisis de precios unitarios, automatizando buena parte del flujo de trabajo del estimador (PlanSwift., s.f.).

En años recientes, herramientas más avanzadas como el *Building Information Modeling* han comenzado a integrarse a los procesos de estimación, particularmente en empresas que buscan mayor trazabilidad y precisión. A través de modelos tridimensionales enriquecidos con datos

(modelos 5D), es posible vincular automáticamente los elementos constructivos con las bases de precios y actualizar los presupuestos en tiempo real ante cualquier cambio en el diseño. Como señala Gómez-Valdés et al. (2023), la adopción de estas plataformas ha tenido un impacto positivo en la gestión de proyectos, aunque requiere una curva de aprendizaje significativa, inversión inicial considerable y personal especializado (Gómez-Valdés et al., 2023; p.75).

Finalmente, es importante reconocer que muchas pequeñas y medianas empresas continúan utilizando herramientas más tradicionales, no por falta de interés en la modernización, sino por limitaciones presupuestarias, resistencia al cambio o falta de personal capacitado. Esto no invalida su uso, pero sí requiere procedimientos internos más rigurosos, validación cruzada de datos y documentación clara que respalde las decisiones estimativas.

En conclusión, las herramientas tradicionales utilizadas para la estimación de costos en construcción han evolucionado desde soluciones manuales y flexibles como Excel, hasta plataformas especializadas con capacidades integradas. La selección de la herramienta adecuada depende no solo del tipo de proyecto y la etapa en la que se encuentra, sino también de los recursos disponibles, la cultura organizacional y la estrategia de gestión adoptada. Entender las capacidades y limitaciones de estas herramientas es esencial para garantizar la coherencia, trazabilidad y utilidad de la información generada en esta fase crítica de la gestión del proyecto.

2.3 Introducción a la Inteligencia Artificial

Dado el carácter crítico del presupuesto en la planificación y ejecución de proyectos, se vuelve pertinente examinar cómo la Inteligencia Artificial puede aportar valor a su desarrollo. Esta sección introduce los fundamentos conceptuales de la IA, trazando una breve evolución histórica y destacando su capacidad para aprender de los datos, identificar patrones y asistir en la toma de decisiones. Se incluyen además las subdisciplinas de mayor aplicabilidad en el ámbito de la construcción y la presupuestación, así como una mirada a la IA como sistema de apoyo, con énfasis en su potencial para fortalecer el análisis, reducir incertidumbres y complementar el criterio profesional.

La Inteligencia Artificial ha emergido en las últimas décadas como una herramienta estratégica clave en múltiples sectores, incluida la industria de la construcción. Su potencial radica en la capacidad de los sistemas inteligentes para aprender, razonar y tomar decisiones a partir de grandes volúmenes de datos, lo que permite abordar desafíos complejos y optimizar procesos

tradicionalmente dependientes del conocimiento humano y técnicas manuales. En este sentido, resulta esencial explorar el concepto de la IA desde sus fundamentos, conocer sus subdisciplinas más relevantes y entender su rol como sistema de apoyo en la toma de decisiones, aspectos que serán abordados en detalle en las subsecciones siguientes.

La subsección 2.3.1 presentará una definición formal de la IA y analizará su evolución histórica, destacando hitos clave que han marcado su desarrollo y expansión hasta su aplicación actual en distintos ámbitos profesionales. En 2.3.2, se detallarán las principales subdisciplinas dentro del campo de la IA, tales como el aprendizaje automático, el procesamiento del lenguaje natural, la visión computacional, entre otras, enfatizando su importancia y posibles aplicaciones dentro del contexto de gestión de proyectos de construcción. Finalmente, la subsección 2.3.3 profundizará en cómo la IA puede actuar como sistema de apoyo a la toma de decisiones, evaluando cómo estos sistemas pueden contribuir a la mejora de la precisión, eficiencia y eficacia en la planificación y gestión de proyectos constructivos, así como los beneficios específicos que su incorporación ofrece a la industria.

En conjunto, estas secciones buscan establecer una comprensión sólida de los conceptos fundamentales de la IA y proporcionar un marco claro para analizar posteriormente su integración práctica en la gestión de presupuestos y toma de decisiones dentro de proyectos de construcción.

2.3.1 Definición y evolución de la inteligencia artificial

La Inteligencia Artificial en palabras de Datta et al. (2024, p.4) “(...) *es el estudio y el desarrollo de sistemas inteligentes con inteligencia, razonamiento, resolución de problemas y capacidad de toma de decisiones similares a los humanos*”. En otras palabras, la IA es una disciplina enfocada en desarrollo de métodos específicos para las máquinas, en donde estas puedan realizar tareas de forma similar a como el ser humano las haría.

La IA inició siendo un campo puramente científico, en donde desarrolló sus principales componentes académicos en las matemáticas, física, neurología, informática y programación, administración de negocios, psicología y otros. La primera vez que se registra históricamente el uso de IA fue durante la Segunda Guerra Mundial, en donde el matemático y científico informático Alan Turing, desarrolló un mecanismo llamado *Bombe*, el cual descifró mensajes del ejército alemán, permitiendo a los aliados localizarlos (Rashid & Kausik, 2024; p.3).

A pesar de que Alan Turing exploró la IA en otros trabajos, quienes revolucionaron la investigación en este tema fueron Allen Newel, Cliff Shaw y Herbert Simon, quienes en la conferencia llamada *Dartmouth Summer Research Project* en 1956 introdujeron la teoría lógica, y es donde nace el término de Inteligencia Artificial. El período entre los años 1956-1974 es considerada la época dorada de la IA. En 1966, los investigadores se centran en el desarrollo de algoritmos para resolver problemas matemáticos. Luego se crea el primer chatboy, llamado ELIZA. En 1972 Japón presenta el primer humanoide denominado WABOT-1. A lo largo de este período también se sientan las bases del conocimiento sobre Redes Neuronales, estas fueron creadas imitando el cerebro humano.

Posteriormente, en los años 80 el ambiente empieza a cambiar con la introducción de los microprocesadores, los dispositivos digitales, las computadoras en red y el internet. Asimismo, esta época fue marcada por el surgimiento de los Sistemas expertos, cuyo objetivo era replicar la toma de decisiones de expertos humanos y favoreció a la vez el desarrollo de otras ramas dentro de la IA. Para el 2011, IBM ganó *Jeopardy* demostrando las capacidades del lenguaje natural y en el 2012 Google introdujo *Google Now* para información predictiva y de ahí para la fecha de hoy día los descubrimientos, experimentaciones y desarrollos se han potenciado y contribuyen a la mejora de gran diversidad de industrias (Rashid & Kausik, 2024; p.4).

Actualmente, el crecimiento acelerado de la IA está sustentado en tres pilares fundamentales: grandes volúmenes de datos (Big Data), poder computacional incrementado (Cloud Computing, GPUs) y algoritmos avanzados, especialmente los basados en redes neuronales profundas (Deep Learning). Estos elementos han permitido potenciar significativamente las aplicaciones prácticas de la IA en la última década.

Debido a su evolución e historia, la IA se puede clasificar de diversas maneras, más obstante, una de las formas más aceptadas es la siguiente (Abioye et al., 2021; p.2):

- ***Artificial Narrow Intelligence (ANI)***: en ocasiones es referida como la inteligencia débil. Esta se especializa en realizar tareas específicas y puntuales, como, por ejemplo, jugar al ajedrez, hacer predicciones de ventas, sugerir películas, pronóstico del clima, entre otras.
- ***Artificial General Intelligence (AGI)***: esta por el contrario es conocida como la inteligencia artificial fuerte. Esta es capaz de realizar cualquier tarea a un nivel similar al del hombre. Un ejemplo de este tipo de IA es cuando a las máquinas se

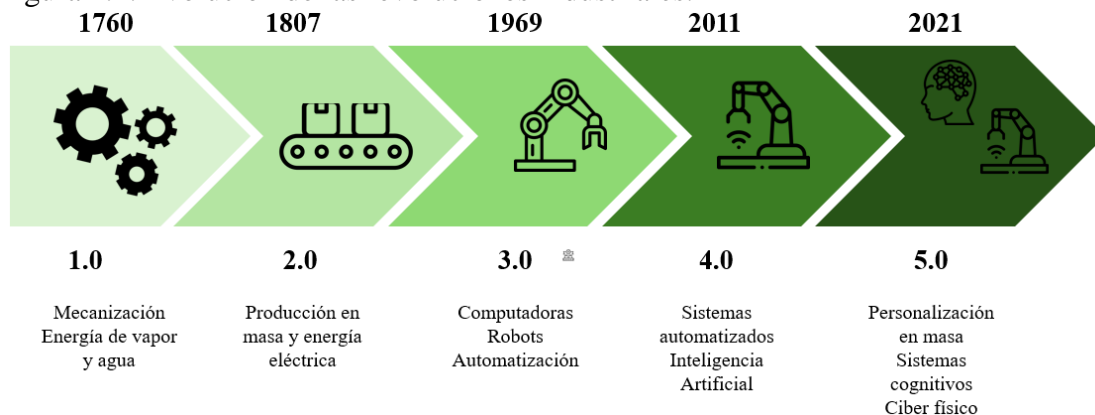
programan para resolver problemas complejos en diferentes dominios, controlarse a sí mismas de manera independiente, con sus propios pensamientos, preocupaciones, sentimientos, fortalezas, debilidades y disposición.

- **Artificial Super Intelligence (ASI):** es la IA que supera las capacidades humanas en todos los aspectos.

Actualmente, la mayoría de las aplicaciones prácticas y funcionales de la IA dentro de la Industria 4.0 corresponden al nivel de Inteligencia Artificial Estrecha (ANI). La Industria 4.0, también conocida como la cuarta revolución industrial, hace referencia a la transformación digital e interconexión de procesos industriales mediante el uso de tecnologías avanzadas como IA, robótica, Internet de las Cosas (IoT), y análisis avanzado de datos. Este tipo de inteligencia artificial se refleja claramente en aplicaciones específicas como el mantenimiento predictivo, la automatización avanzada de procesos, robótica colaborativa y la gestión inteligente de activos industriales, contribuyendo a incrementos significativos en productividad, eficiencia y seguridad. Por otro lado, aunque las categorías de Inteligencia Artificial General (AGI) y Super Inteligencia Artificial (ASI) aún permanecen en gran medida dentro del ámbito teórico y prospectivo, su desarrollo futuro podría representar una revolución tecnológica completa que afectaría profundamente no solo al sector de la construcción, sino también transversalmente a múltiples industrias y a la sociedad en general (Rashid & Kausik, 2024).

Finalmente, cabe destacar el impacto transversal actual de la IA en diversas industrias, lo que proporciona un marco comparativo valioso para comprender su aplicación específica dentro del sector construcción (Nabizadeh Rafsanjani & Nabizadeh, 2023).

Figura 2.1. Evolución de las revoluciones industriales.



Nota: Adaptado del artículo The Era of Industry 5.0: An Overview of Technologies, Applications, and Challenges (Bazel et al., 2024; p.275).

2.3.2 Subdisciplinas relevantes de la IA

La Inteligencia Artificial se compone de varias subdisciplinas que, al aplicarse en conjunto o de forma individual, permiten automatizar procesos, reconocer patrones complejos y tomar decisiones informadas en distintos contextos. En el campo de la presupuestación de proyectos de construcción, algunas de estas áreas son especialmente relevantes por su capacidad de procesar grandes volúmenes de datos, analizar documentos técnicos, interpretar imágenes y generar resultados explicables y útiles para profesionales del sector.

Una de las ramas más ampliamente utilizadas es el aprendizaje automático, cuyo enfoque consiste en permitir que los sistemas mejoren su rendimiento mediante la exposición a datos. Existen tres formas principales de ML. En primer lugar, el aprendizaje supervisado, en el cual se entrena un modelo con datos etiquetados, es útil para tareas como la predicción de costos a partir de bases de datos históricas. En segundo lugar, el aprendizaje no supervisado analiza datos sin etiquetar para detectar patrones ocultos, permitiendo identificar relaciones no evidentes entre factores que influyen en los presupuestos. Finalmente, el aprendizaje por refuerzo permite que un agente aprenda estrategias de decisión mediante prueba y error, lo cual puede aplicarse en escenarios de planificación dinámica de recursos (Morales, 2017; p. 167).

Relacionada estrechamente con el ML, el aprendizaje profundo se apoya en redes neuronales artificiales compuestas por múltiples capas que simulan el funcionamiento del cerebro humano. Estas redes pueden procesar enormes volúmenes de información no estructurada y encontrar patrones complejos. En la industria de la construcción, las redes neuronales profundas han sido utilizadas para estimar el costo de proyectos durante etapas conceptuales, modelando relaciones no lineales entre múltiples variables (Mendoza et al., 2022; p.82).

Por otro lado, la visión por computadora permite que las máquinas extraigan e interpreten información visual a partir de imágenes o videos. En contextos constructivos, esta tecnología ha sido utilizada para analizar imágenes de obras, detectar errores de ejecución y extraer datos de planos constructivos. Esto permite automatizar el proceso de verificación en sitio y generar datos cuantificables que pueden integrarse al análisis presupuestario (Morales, 2017; p.169).

El procesamiento de lenguaje natural, por su parte, hace posible que los sistemas informáticos comprendan y generen lenguaje humano. Esta tecnología se ha aplicado en la lectura de pliegos de condiciones, contratos, especificaciones técnicas y otros documentos textuales que forman parte de los procesos de presupuesto. Gracias al NLP, es posible extraer requisitos

específicos, detectar ambigüedades y generar reportes automáticos que simplifican la gestión documental (Mendoza et al., 2022; p.83).

Finalmente, el razonamiento automatizado y los sistemas expertos permiten representar conocimiento especializado mediante reglas lógicas y bases de hechos. Estos sistemas, al emular el juicio de expertos humanos, pueden evaluar distintas alternativas presupuestarias, emitir alertas ante inconsistencias y recomendar ajustes con base en criterios predefinidos. Este enfoque es especialmente útil cuando se requiere validar propuestas bajo normativas estrictas o condiciones técnicas específicas (Morales, 2017; p.170).

En conjunto, estas subdisciplinas permiten construir soluciones integrales de inteligencia artificial capaces de asistir al profesional en cada fase del proceso presupuestario, desde la recopilación de datos hasta la validación y mejora continua del modelo de estimación.

2.4 Teorías aplicadas a la integración de IA en la presupuestación de proyectos de construcción

A partir del entendimiento de las aplicaciones generales de la inteligencia artificial en la gestión de proyectos, se profundiza ahora en su incorporación particular durante la etapa de presupuestación. Esta sección examina los principales marcos teóricos que permiten analizar la adopción tecnológica en organizaciones (como los modelos TAM, TOE y UTAUT), los elementos clave para una integración técnica y operativa efectiva, y los mecanismos necesarios para validar los resultados generados por IA. El objetivo es establecer una base conceptual sólida que permita evaluar el uso de estas tecnologías emergentes como herramientas de apoyo en la toma de decisiones presupuestarias, con sustento metodológico y organizacional.

Esta sección se divide en tres partes. En primer lugar, se exploran los principales modelos de adopción tecnológica que ayudan a explicar cómo y por qué las organizaciones deciden incorporar IA en sus procesos presupuestarios. Continuamente, se identifican los elementos clave que inciden en una integración efectiva de estas tecnologías, considerando aspectos técnicos, organizacionales y humanos. Y, finalmente, se aborda el proceso de validación de los resultados generados por los modelos de IA en la etapa de presupuestación, con el fin de garantizar su confiabilidad y utilidad práctica. En conjunto, estos componentes permiten una visión estructurada y crítica de los fundamentos teóricos que sustentan la transformación digital en la estimación de costos de proyectos constructivos.

2.4.1 Modelos de adopción tecnológica aplicables

La implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción es un proceso complejo que requiere una comprensión profunda de los modelos teóricos que explican la adopción de nuevas tecnologías. Entre los más reconocidos se encuentran el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM), el Marco Tecnología-Organización-Entorno (TOE) y la Teoría Unificada de Aceptación y Uso de la Tecnología (UTAUT).

El TAM, desarrollado por Davis en 1989, postula que la aceptación de una tecnología por parte de los usuarios está determinada por dos factores principales: la utilidad percibida y la facilidad de uso percibida. En el contexto de la construcción, un estudio de Sorce & Issa (2021), adaptó el TAM para comprender la adopción de tecnologías de información y comunicación (TIC), destacando la importancia de las percepciones de los usuarios en este proceso. Los resultados indican que la percepción de que una tecnología mejora el desempeño laboral y es fácil de usar, influye positivamente en su adopción en el sector de la construcción.

Por su parte, el marco TOE, propuesto por Tornatzky y Fleischer en 1990, sugiere que la adopción de innovaciones tecnológicas está influenciada por tres contextos: tecnológico, organizacional y ambiental. Una investigación realizada por Na et al. (2022), aplicó el marco TOE junto con el TAM para explorar los factores que influyen en la intención y aceptación de tecnologías basadas en IA en empresas de construcción. El estudio encontró que factores tecnológicos y organizacionales tienen un impacto positivo en la percepción de facilidad de uso de la IA, mientras que los factores ambientales no mostraron una influencia significativa.

Finalmente, la UTAUT, desarrollada por Venkatesh et al. (2003), integra elementos de diversos modelos de aceptación tecnológica para explicar la intención de uso y el comportamiento de adopción. Aunque su aplicación específica en la adopción de IA en la construcción es limitada, estudios en contextos relacionados han extendido la UTAUT incorporando dimensiones como la confianza y la privacidad, encontrando que la intención de comportamiento está positivamente asociada con la confianza, la influencia social, la expectativa de esfuerzo y la expectativa de rendimiento.

En resumen, los modelos TAM, TOE y UTAUT ofrecen marcos teóricos valiosos para comprender los factores que influyen en la adopción de IA en la presupuestación de proyectos de construcción. La aplicación efectiva de estos modelos requiere adaptaciones al contexto específico

del sector, considerando las particularidades organizacionales, culturales y técnicas que influyen en la implementación de nuevas tecnologías.

2.4.2 Elementos clave en la integración de IA en la presupuestación

Si bien en la sección anterior se abordaron los beneficios generales que la inteligencia artificial puede ofrecer a la gestión de proyectos, es importante destacar que la etapa de presupuestación posee particularidades que exigen un análisis más específico. En este sentido, la integración efectiva de IA en los procesos presupuestarios no solo depende de sus capacidades técnicas, sino también de condiciones organizacionales, la calidad de los datos disponibles y la interoperabilidad con otras herramientas utilizadas en esta fase. A continuación, se detallan los elementos clave que inciden directamente en la implementación de IA dentro del flujo de trabajo presupuestario.

La integración de IA en la presupuestación de proyectos de construcción implica una serie de condiciones técnicas y organizacionales que determinan su efectividad. A diferencia de la aplicación general de IA en proyectos, en esta etapa específica el foco está en cómo se capturan, procesan y transforman los datos necesarios para generar estimaciones confiables. Esto exige no solo el uso de algoritmos robustos, sino también una infraestructura que permita que la IA interactúe correctamente con otras herramientas de diseño, medición y control de costos.

Uno de los elementos más relevantes es la estructura de los datos presupuestarios. Para que la IA pueda generar predicciones útiles, es indispensable contar con bases de datos históricas bien organizadas, etiquetadas y representativas del tipo de proyecto a estimar. Ivanova et al. (2023; p.21) advierten que, en ausencia de información consistente sobre costos anteriores, rendimientos y volúmenes reales, los algoritmos tienden a producir estimaciones erráticas o poco realistas. Además, el tipo de datos que se requiere en esta etapa debe incluir tanto variables técnicas (metraje, materiales, rendimiento) como factores de contexto (localización, clima, normativa).

La interoperabilidad entre sistemas es otro factor determinante, esto debido a que la IA no opera de forma aislada, sino que debe integrarse con plataformas como modelos BIM, bases de datos de costos, herramientas de *take-off* automatizado y sistemas de gestión de proyectos. Una implementación exitosa requiere que los sistemas compartan estándares, formatos y flujos de datos que permitan una comunicación fluida. Por ejemplo, cuando la IA extrae cantidades directamente desde modelos BIM y las cruza con bases de datos de precios, el proceso de presupuestación se

vuelve más ágil y preciso, siempre y cuando los sistemas estén correctamente conectados (Nabizadeh Rafsanjani & Nabizadeh, 2023; p.5).

En paralelo, se vuelve crucial la validación previa de los insumos que alimentan los modelos. A diferencia de otras etapas, la presupuestación se basa en datos proyectados más que en datos reales, por lo que cualquier error en los valores de entrada puede amplificarse en los resultados finales. Como resultado, se recomienda establecer filtros de calidad y reglas de validación que detecten inconsistencias, rangos atípicos o combinaciones de datos inusuales antes de que sean utilizados en las estimaciones. Esta validación puede ser manual, automatizada o híbrida, pero debe formar parte del flujo estándar (Knauf et al., 1999; p.6-7).

Otro elemento clave es la colaboración entre IA y especialistas humanos en presupuestos. Aun cuando los modelos generen estimaciones precisas, la experiencia del profesional sigue siendo esencial para interpretar resultados, identificar riesgos atípicos y ajustar partidas especiales. La IA debe actuar como un sistema de apoyo, no como un reemplazo, integrándose en el flujo de trabajo de forma que complemente el juicio experto y permita iteraciones más ágiles (Prieto, 2020; p.4-5).

Finalmente, el proceso de integración debe contemplar la retroalimentación continua. A medida que los proyectos avanzan y se recopilan datos reales, estos deben ser utilizados para refinar los modelos de IA. Este enfoque cíclico, basado en aprendizaje supervisado, permite mejorar la precisión de futuras estimaciones. Según Ivanova et al. (2023; p.29) la capacidad de adaptar los modelos con base en resultados medidos, y no solo proyectados, es lo que convierte a la IA en una herramienta estratégica para la presupuestación a mediano y largo plazo.

En resumen, integrar IA en la etapa de presupuestación requiere mucho más que adoptar un software: demanda datos bien estructurados, interoperabilidad, validación rigurosa, participación activa de expertos y un ciclo continuo de aprendizaje. Estos elementos no solo aumentan la precisión de los estimados, sino que fortalecen la capacidad de respuesta de la organización ante la incertidumbre.

2.4.3 Validación de resultados generados por IA

La implementación de modelos de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción conlleva la necesidad de validar rigurosamente los resultados generados antes de que puedan ser utilizados como base para la toma de decisiones. La validación no solo

asegura que los sistemas funcionen de manera correcta desde el punto de vista técnico, sino que también garantiza que las salidas sean comprensibles, relevantes y contextualizadas para el entorno específico del proyecto. A diferencia de la verificación, que se centra en confirmar que el sistema fue construido correctamente, la validación busca determinar si el sistema cumple con su propósito y genera resultados adecuados para el usuario final (Prieto, 2020; p.4).

En el contexto de la presupuestación, este proceso adquiere especial relevancia debido a las implicaciones económicas, operativas y contractuales que pueden derivarse de una estimación inexacta. Por ello, validar los resultados implica evaluar no solo la precisión técnica del modelo, sino también la calidad de los datos de entrada, la coherencia con los parámetros del proyecto y la adecuación del modelo al tipo de análisis requerido. Por lo tanto, una validación efectiva de sistemas basados en reglas o aprendizaje automático debe contemplar un ciclo iterativo de evaluación, donde se comparen los resultados generados con datos históricos o casos reales, y se ajusten progresivamente los parámetros para mejorar el rendimiento (Knauf et al., 1999).

Asimismo, es importante reconocer que la validación no puede entenderse como un proceso exclusivamente automatizado. La intervención humana sigue siendo indispensable para interpretar los resultados, identificar sesgos y evaluar si las salidas del modelo se ajustan a las condiciones del proyecto. Según Prieto (2020, p.5), se destaca que los modelos de IA, si bien eficaces para detectar patrones, pueden amplificar errores si no se contextualizan correctamente, especialmente cuando las variables de entrada son incompletas o sesgadas. De ahí que se recomiende combinar enfoques cualitativos, como, por ejemplo, la validación por expertos; con métodos cuantitativos de evaluación de desempeño, como errores medios absolutos o coeficientes de correlación.

La validación debe además considerar el enfoque ético y de transparencia. Un modelo de IA utilizado para estimar costos debe poder explicar por qué generó ciertos resultados, en qué variables se apoyó y cuáles fueron los supuestos incorporados. Esta necesidad de explicar cobra mayor fuerza en entornos donde las decisiones deben ser auditables o compartidas con terceros. Los sistemas de IA deben evitar caer en la opacidad algorítmica y, en cambio, facilitar la comprensión de sus mecanismos internos, sobre todo cuando están involucrados aspectos sensibles como la inversión financiera o la asignación de recursos (Alpaydin, 2014; p.13-14).

Otro elemento clave para una validación robusta es el alineamiento con el contexto organizacional. La forma en que se define el éxito del modelo, los parámetros que se priorizan y

la frecuencia de revisión deben estar alineados con las dinámicas del proyecto y la cultura de la organización. En este sentido, la validación de tecnologías inteligentes no puede desligarse del entorno en que se aplican; por el contrario, debe estar integrada a los procesos internos, contar con el respaldo de los equipos involucrados y ajustarse a los niveles de madurez digital existentes (Na et al., 2022; p.9).

En síntesis, la validación de los resultados generados por IA en la presupuestación de proyectos de construcción no es un proceso único ni lineal. Requiere una combinación de revisión técnica, interpretación humana, evaluación contextual y enfoque ético. Solo mediante este abordaje integral es posible garantizar que la tecnología realmente aporte valor, fortalezca la confianza en los procesos de estimación y contribuya a una toma de decisiones más precisa y fundamentada.

Capítulo 3 Marco metodológico

El presente capítulo pretende establecer el enfoque y las estrategias implementadas para desarrollar la presente investigación, buscando rigurosidad y validez en el proceso de recolección y análisis de datos. La finalidad de este estudio es lograr sintetizar los desafíos y los beneficios de la aplicación de IA en la gestión de presupuestos de proyectos de construcción, y esto se plantea llevar a cabo mediante una combinación de herramientas metodológicas, como lo son el análisis documental, estudios de casos, entrevistas semiestructuradas y encuestas.

Con la finalidad de lograr este objetivo, se opta por el empleo de un enfoque predominantemente cualitativo con un componente cuantitativo. Esto permite profundizar en la percepción de los profesionales del sector y contrastar la información teórica con la realidad del mercado. Además, la metodología se estructura en fases que incluyen la recopilación de información, su análisis y la formulación de estrategias aplicables a la industria.

Dentro de las secciones propuestas se describen las variables de estudio y las categorías de análisis que cruzan la investigación de forma transversal. Asimismo, se especifica las características de los sujetos y las fuentes de información principales, así como también, las herramientas y métodos para el procesamiento y análisis de todos los datos. Una vez procesada la información se generarán los productos y subproductos correspondientes a cada objetivo específico.

Finalmente, cabe destacar la relevancia de la combinación de fuentes de información, con el objetivo de triangular la información para obtener resultados generalizables y cuantificables, los cuales son esenciales para alimentar y justificar la investigación.

3.1 Tipos de investigación

Dentro de la comunidad científica es fundamental definir el enfoque mediante el cual se va a abordar la recolección de datos de la investigación, ya que esto puede tener un alto impacto en los resultados de esta. Por lo tanto, se define que la presente investigación emplea un enfoque mixto debido a que “(...) combina la rigurosidad de los métodos cuantitativos con la profundidad de los métodos cualitativos, con el objetivo de obtener una comprensión más completa y enriquecedora de los fenómenos estudiados” (Medina Romero et al., 2023; p.14).

Este enfoque es particularmente relevante para la investigación, ya que el análisis de la implementación de la inteligencia artificial en la gestión de presupuestos de proyectos de

construcción requiere tanto la evaluación de datos concretos sobre su desempeño y precisión, como también, información de la interpretación de las percepciones, barreras y oportunidades identificadas por los profesionales del sector. De esta manera, se busca, no solo describir el estado actual de la tecnología en este ámbito, sino también generar una visión integral que combine la objetividad de los datos con la experiencia práctica de los actores involucrados, lo que permite orientar propuestas más sólidas y aplicables a la realidad del sector construcción.

3.1.1 Investigación Cualitativa

La investigación cualitativa tiene como objetivo comprender a profundidad fenómenos complejos y subjetivos (Medina Romero et al., 2023; p.18). Por su parte, esta se basa en la recolección y análisis de datos no numéricos, y se va a realizar mediante el uso de una entrevista semiestructurada, revisión bibliográfica y estudios de caso.

Las entrevistas semiestructuradas están diseñadas para recopilar información cualitativa en profundidad sobre retos de actuales de la presupuestación dentro de la industria, y también, sobre la aplicación de la IA en la gestión de presupuestos de proyectos de construcción. Se centran en explorar experiencias, percepciones y desafíos desde la perspectiva de profesionales con experiencia en el sector, y se van a centrar en las siguientes temáticas:

- Experiencia con IA en la presupuestación de proyectos desde la perspectiva de expertos en presupuestación.
- Métodos y criterios utilizados en la estimación de costos y su evolución con la incorporación de IA.
- Limitaciones y barreras en la adopción de IA desde diferentes roles dentro de la industria.
- Factores de éxito en la implementación de IA en presupuestación.
- Impacto de la IA en la precisión de las estimaciones y optimización de recursos.
- Percepciones y grado de aceptación de la IA por parte de diferentes actores del sector.
- Estrategias de adopción de IA en empresas de construcción según tamaño y modelo de negocio.
- Evaluación de la confiabilidad y aplicabilidad de las herramientas de IA en presupuestación desde la perspectiva de expertos en el área.

Esta información cualitativa permitirá profundizar en los hallazgos obtenidos en la revisión documental y las encuestas estructuradas, proporcionando contexto sobre los desafíos y

oportunidades de la IA en presupuestación. También servirá como base para la formulación del marco de referencia y la hoja de ruta para su implementación efectiva.

3.1.2 Investigación Cuantitativa

Por su parte, la investigación con un enfoque cuantitativa se basa en la recolección y análisis de datos. Esta es utilizada para medir, cuantificar variables, establecer relaciones y realizar generalidades estadísticas (Medina Romero et al., 2023; p.17). Es relevante mencionar que en este tipo de investigaciones se es requerido de una muestra grande y representativa para lograr así garantizar la precisión estadística y la generalización de los resultados.

En el marco de esta investigación, el enfoque cuantitativo se encuentra representado en la aplicación de una encuesta estructurada dirigida a profesionales del sector construcción que tienen experiencia en presupuestación de proyectos. Esta encuesta incluye preguntas cerradas, con el objetivo de medir percepciones, frecuencia de uso y niveles de conocimiento sobre herramientas de inteligencia artificial aplicadas a la etapa de estimación de costos.

El enfoque cuantitativo tendrá un papel relevante en la medición y análisis de datos relacionados con la implementación de Inteligencia Artificial aplicado en la gestión de presupuestos, y tiene como finalidad, mediante la aplicación de una encuesta, medir los siguientes temas:

- **Desafíos de la gestión de proyectos de construcción:** medida mediante afirmaciones que exploran los principales obstáculos técnicos, operativos y organizativos en los procesos de presupuestación.
- **Uso actual de herramientas de IA en presupuestación:** medida con preguntas cerradas que exploran el uso efectivo de tecnologías como hojas de cálculo, software especializado y herramientas con IA.
- **Percepción sobre la precisión y eficiencia de la IA en presupuestación:** evaluada mediante afirmaciones sobre la exactitud, rapidez y utilidad práctica que los participantes atribuyen a la IA en esta fase del proyecto.
- **Limitaciones y barreras en la implementación de IA:** medida mediante afirmaciones relacionadas con barreras técnicas, económicas, culturales y organizacionales que dificultan su adopción.

- **Interés en la adopción de IA y necesidad de estrategias para su implementación:** evaluada mediante el grado de acuerdo con afirmaciones sobre intención de adopción, disposición al cambio y necesidad de acompañamiento institucional.

Cada variable fue operacionalizada de forma clara y dirigida, asegurando que fueran susceptibles de análisis estadístico. El tratamiento de estos datos se realizará mediante estadísticas descriptivas, permitiendo identificar patrones relevantes y contrastar percepciones entre distintos perfiles de participantes.

En cuanto a la muestra, esta corresponde a una selección intencional y no probabilística, conformada por profesionales con experiencia directa en presupuestación, provenientes de empresas constructoras, consultoras y entidades públicas. Si bien no se persigue una representatividad estadística universal, se asegura una diversidad temática y práctica relevante, adecuada para el enfoque exploratorio de esta investigación.

Por consiguiente, el componente cuantitativo permite complementar la visión cualitativa derivada de las entrevistas y estudios de caso, brindando una triangulación metodológica sólida que robustece el análisis y enriquece la comprensión integral del fenómeno investigado.

3.1.3 Investigación Mixta

“(…), como su nombre lo indica, combina elementos de los métodos cuantitativo y cualitativo. (...) busca aprovechar las fortalezas de ambos métodos para obtener una comprensión más completa y enriquecedora de los fenómenos estudiados” (Medina Romero et al., 2023; p.16). Por su parte, como mencionan los autores, este método facilita la triangulación de datos, aumentando la validez y niveles de confiabilidad de los resultados de la investigación.

El diseño mixto utilizado en esta investigación será de tipo explicativo secuencial. En la primera fase, se aplicará la metodología cuantitativa mediante encuestas estructuradas dirigidas a profesionales del sector de la construcción, con el fin de recolectar información estadística sobre el uso, percepción y barreras de la IA en la presupuestación. Posteriormente, se desarrollará la fase cualitativa, donde se profundizará en los resultados obtenidos a través de entrevistas semiestructuradas y análisis de casos. Este método permite explicar los datos cuantitativos en mayor detalle y proporcionar una comprensión contextualizada de los desafíos y oportunidades en la adopción de IA.

Las ventajas de la investigación mixta en este estudio incluyen:

- Triangulación de datos para obtener resultados más robustos y confiables.
- Mayor profundidad en la comprensión de los hallazgos.
- Posibilidad de identificar tendencias y correlaciones, complementando con información cualitativa que explique las razones detrás de los patrones observados.
- Evaluación integral de la viabilidad, aplicabilidad y percepción de la IA en la presupuestación de proyectos de construcción.

El análisis de la información obtenida seguirá un enfoque convergente, en el cual los datos cuantitativos y cualitativos se contrastarán para identificar patrones comunes, discrepancias y posibles líneas de acción para la implementación de IA en el sector. De esta forma, se garantizará que los resultados de la investigación proporcionen una visión amplia y aplicable al contexto real de la industria de la construcción.

3.2 Categorías de la investigación

En esta sección se describen las categorías con las que va a contar la investigación, las cuales constituyen los elementos fundamentales a examinar y observar durante el proceso investigativo.

Las categorías se han seleccionado con base en los tres elementos fundamentales bajo los cuales se basa la investigación, iniciando por los proyectos de construcción, seguido por la gestión de costos de estos y, por último, el aporte de la Inteligencia Artificial a nivel global. Con base en estas categorías, se determinan las preguntas generadoras, las cuales vienen a simplificar el proceso de recopilación de información, utilizando herramientas y técnicas especializadas que posibilitan un enfoque integral para abordar la problemática de la investigación.

Cuadro 3.1. Definición de las categorías de la investigación.

| Categoría | Definición conceptual de la categoría | Subcategorías | Definición conceptual de subcategorías | Pregunta Generadora | Técnicas | Instrumentos |
|--|---|----------------------------------|--|---|--|--|
| Categoría A Proyectos de construcción | Procesos y actividades involucradas en la planificación y ejecución de proyectos de edificación. | Desafíos | Problemas y obstáculos comunes en proyectos de construcción. | A1.1. ¿Cuáles son los principales desafíos en proyectos de construcción? | Revisión bibliográfica. Entrevistas semiestructuradas. | Formulario de recolección de información (Apéndice A) |
| | | Necesidades | Requerimientos técnicos y operativos para el éxito del proyecto. | A1.2. ¿Cuáles son las principales necesidades en la ejecución de proyectos de construcción? | Encuesta estructurada. | Guía de entrevista (Apéndice B) Cuestionario (Apéndice C) |
| | | Tendencias | Innovaciones y prácticas emergentes en la industria. | A1.3. ¿Cuáles son las tendencias actuales en la construcción? | | |
| Categoría B Gestión del costo en proyectos de construcción | Prácticas actuales de gestión de costos en proyectos de construcción, enfocado en la precisión y eficiencia en el proceso de presupuestación. | Alcance de la gestión de costos. | Límites y responsabilidades dentro de la gestión de proyectos. | B1.1. ¿Cuál es el alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción? | Estudio de casos. Encuestas estructuradas. | Guía de caso de estudio (Apéndice D) Guía de entrevista (Apéndice B) Cuestionario (Apéndice C) |
| | | Eficiencia presupuestaria | Capacidad de optimizar los costos y reducir el desperdicio de recursos en proyectos de construcción. | B1.2. ¿Cómo se puede mejorar la eficiencia en la elaboración de presupuestos? | Entrevistas semiestructuradas. Revisión bibliográfica. | Formulario de recolección de información (Apéndice A) |
| | | Precisión presupuestaria | Evaluación de la exactitud y la fiabilidad de las estimaciones de costos en proyectos de construcción, buscando minimizar los errores. | B1.3. ¿Qué factores afectan la precisión de los presupuestos en construcción? | | |
| Categoría C Inteligencia Artificial | Rama de la informática que permite a las máquinas imitar funciones cognitivas humanas. | Tipología de IA existente. | Diferentes tipos de IA aplicables en diversos sectores. | C1.1. ¿Cuáles son las principales tipologías de IA aplicadas específicamente en la presupuestación de proyectos de construcción? | Estudio de casos. Encuestas estructuradas. Entrevistas semiestructuradas. Revisión bibliográfica. | Guía de caso de estudio (Apéndice D) Guía de entrevista (Apéndice B) Cuestionario (Apéndice C) |
| | | Beneficios y limitaciones | Ventajas y desafíos en la aplicación de IA. | C1.2. ¿Cuáles son los beneficios y limitaciones percibidas del uso de IA en la estimación de presupuestos en proyectos constructivos? | | Formulario de recolección de información (Apéndice A) |

| Categoría | Definición conceptual de la categoría | Subcategorías | Definición conceptual de subcategorías | Pregunta Generadora | Técnicas | Instrumentos |
|-----------|---------------------------------------|--|--|---|----------|--------------|
| | | Estrategias de implementación | Formas de introducir IA de manera efectiva. | C1.3. ¿Qué estrategias han resultado más efectivas para implementar IA en procesos de presupuestación dentro del sector construcción? | | |
| | | Buenas prácticas/ lecciones aprendidas | Experiencias exitosas que pueden guiar futuras implementaciones. | C1.4. ¿Qué lecciones se pueden extraer de experiencias previas en el uso de IA para presupuestar proyectos de construcción? | | |

Nota: Elaboración propia.

3.3 Población y muestra – Sujetos de investigación

La definición de la población y muestra en una investigación es un aspecto clave para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. En el presente estudio, se delimita un grupo de sujetos de investigación cuyas características sean representativas del fenómeno estudiado, esto con la finalidad de obtener datos que permitan analizar la aplicación de la inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Por tanto, la selección de estos sujetos se realiza en función de su experiencia en gestión de costos, uso de herramientas tecnológicas y participación en la toma de decisiones dentro del proceso de estimación de presupuestos. A partir de esta muestra, se busca obtener información relevante que contribuya a la comprensión del impacto de estas tecnologías en la precisión y eficiencia de la gestión de costos en la industria de la construcción.

La selección de la población se ha estructurado en tres grupos complementarios, dependiendo de la herramienta de recolección de datos que se vaya a aplicar. Primeramente, para las entrevistas semiestructuradas se tiene a los expertos en presupuestación de construcción aportando información valiosa sobre los métodos tradicionales de estimación de costos, los desafíos que enfrentan y la necesidad de innovación en este proceso. Segundo, se incluye en las entrevistas una población de profesionales en construcción con conocimientos en inteligencia artificial, los cuales permiten comprender cómo estas herramientas están siendo aplicadas en la industria, identificando oportunidades y limitaciones en su implementación dentro del área de

presupuestación. La tercera muestra corresponde, a la población definida para las encuestas estructuradas, que estará conformada por profesionales de la industria en construcción en general.

1. Expertos en presupuestación de proyectos de construcción.

- Profesionales con experiencia en estimación de costos, presupuestos y control financiero en proyectos de construcción.
- Pueden ser gerentes de proyectos, estimadores, analistas de costos o consultores.
- No es necesario que tengan experiencia en IA, pero sí que dominen los procesos tradicionales de presupuestación.

2. Expertos en construcción con conocimientos en IA:

- Profesionales con experiencia en proyectos de construcción que, además, han trabajado con tecnologías emergentes aplicadas al sector.
- No tienen que ser especialistas en IA, pero sí contar con conocimientos sobre su uso en la industria, como BIM con IA, machine learning para análisis de datos de construcción, o herramientas digitales avanzadas.

3. Profesionales de la industria de la construcción:

- Profesionales que trabajan en el sector, pero que no necesariamente tienen experiencia directa en presupuestación.

Esta segmentación responde a la necesidad de obtener una visión integral y realista del fenómeno estudiado, permitiendo contrastar la experiencia de quienes trabajan directamente con presupuestos y aquellos que han experimentado la aplicación de la tecnología en la industria. De esta manera, la investigación podrá identificar los factores clave que determinan la viabilidad y los beneficios de la adopción de inteligencia artificial en la gestión de presupuestos de proyectos de construcción.

En cuanto a la caracterización y el tamaño de la muestra, esta se diferencia entre los dos enfoques de recolección de información, ya que ambas técnicas cuentan con objetivos distintos. Cabe de notar que el tamaño de las muestras en esta investigación ha sido determinado en función de los objetivos del estudio, la viabilidad de acceso a los participantes y la naturaleza del análisis requerido. Esas son las siguientes:

1. **Muestra para entrevistas semiestructuradas:** La muestra de entrevistas está conformada por un grupo de 8 a 10 profesionales, seleccionados mediante un muestreo no probabilístico intencionado.

- Se seleccionó este número de participantes porque la investigación busca obtener información cualitativa detallada, lo que requiere entrevistas en profundidad con expertos en presupuestación y/o tecnologías aplicadas a la construcción.
- Además, el acceso a expertos con experiencia en presupuestación y conocimiento en herramientas tecnológicas puede ser limitado, por lo que este tamaño de muestra es adecuado dentro del contexto del estudio.

Se establecen los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Criterios de inclusión (perfil de los entrevistados):
 - Profesionales con al menos cinco años de experiencia en la industria de la construcción, que se desempeñen como estimadores de costos, gerentes de proyectos, especialistas en presupuestación o consultores académicos vinculados al área.
 - Experiencia comprobada en presupuestación, estimación de costos o gestión financiera de proyectos de construcción, preferiblemente en obras de mediana o gran escala.
 - En el caso de los expertos en construcción con conocimientos en IA, se requiere experiencia en el uso o implementación de herramientas digitales avanzadas en proyectos de construcción, tales como BIM, *machine learning* o software de optimización de costos.
- Criterios de exclusión:
 - Profesionales sin experiencia en presupuestación o gestión de costos en la construcción.
 - Expertos en inteligencia artificial sin relación con la industria de la construcción.
 - Personas sin conocimiento relevante para el análisis del impacto de la IA en presupuestación.

2. Muestra para encuestas estructuradas: Para complementar la información obtenida en las entrevistas, se aplicarán encuestas a un grupo más amplio de 25 a 35 profesionales que formen parte del sector de la construcción. A diferencia del grupo de entrevistas, esta muestra no requiere que los participantes sean especialistas en presupuestación o IA, sino que pertenezcan a la industria y puedan aportar información sobre la percepción general de la adopción de nuevas tecnologías en la gestión de costos.

- Se determinó este rango de encuestados para obtener una visión representativa del sector de la construcción en Costa Rica, enfocándose en la percepción general sobre la adopción de herramientas tecnológicas en presupuestación.
- La cantidad seleccionada permite un equilibrio entre viabilidad de recolección de datos y suficiencia para analizar patrones en la adopción de tecnología en presupuestación.

Se establecen los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Criterios de inclusión (perfil de los encuestados):
 - Profesionales que formen parte del sector de la construcción, incluyendo ingenieros, arquitectos, residentes de obra, supervisores, jefes de campo o personal administrativo vinculado a la gestión de proyectos.
 - Personas con al menos tres años de experiencia comprobada en la industria, en cualquiera de sus áreas funcionales.
 - Disposición para responder la encuesta de manera voluntaria y con información veraz.
- Criterios de exclusión:
 - Personas que no trabajen en la industria de la construcción.
 - Profesionales con menos de tres años de experiencia en el sector.
 - Respuestas incompletas o inválidas dentro del cuestionario.

La delimitación de la población y muestra en este estudio garantiza la recopilación de información relevante desde distintas perspectivas dentro del sector de la construcción. A través de un enfoque segmentado, que incluye entrevistas con expertos en presupuestación y tecnología,

así como encuestas a profesionales del sector, se busca obtener un análisis integral sobre la viabilidad y el impacto potencial de la inteligencia artificial en la gestión de costos. Esta estrategia metodológica permitirá contrastar conocimientos especializados con la percepción general de la industria, proporcionando una base sólida para evaluar la adopción de estas tecnologías en la presupuestación de proyectos de construcción.

3.4 Fuentes de información

La presente investigación se fundamenta en el análisis y recopilación de información de fuentes primarias y secundarias con el objetivo de garantizar un enfoque metodológico integral y estructurado. Por tanto, la correcta clasificación de estas fuentes permite desarrollar un marco teórico sólido y una validación efectiva de los hallazgos, asegurando la relevancia de la información utilizada.

1. **Fuentes Primarias:** Las fuentes primarias comprenden aquellos insumos que permiten obtener información de primera mano sobre el uso de la inteligencia artificial (IA) en la presupuestación de proyectos de construcción. Se incluyen datos recopilados directamente de actores clave del sector, procesos documentados y herramientas específicas utilizadas en la industria. La relevancia de estas fuentes radica en su capacidad para proporcionar evidencia empírica sobre la aplicabilidad, beneficios y limitaciones de la IA en este contexto.

Dentro de estas fuentes se consideran documentos generados por organizaciones de la industria, normativas aplicadas en entornos reales y testimonios de profesionales con experiencia directa en la gestión de costos y presupuestación asistida por IA. Estas fuentes permiten no solo analizar la factibilidad de las soluciones tecnológicas, sino también identificar desafíos y oportunidades en su implementación.

2. **Fuentes Secundarias:** Las fuentes secundarias comprenden aquellos materiales que sirven como base teórica para contextualizar la investigación, proporcionando un marco de referencia a partir del cual se analizan tendencias y desarrollos en la aplicación de IA en la construcción. Estas fuentes incluyen literatura académica, estudios de caso documentados, artículos científicos y reportes de instituciones reconocidas en el ámbito de la construcción y la gestión de proyectos.

Su importancia radica en la posibilidad de contrastar hallazgos obtenidos en las fuentes primarias con información previamente documentada, permitiendo identificar patrones, correlaciones y enfoques teóricos relevantes. Además, estas fuentes ofrecen una visión global sobre el impacto de la IA en la industria, facilitando la formulación de conclusiones fundamentadas y la propuesta de estrategias de implementación basadas en evidencia.

En conjunto, como se visualiza en el Cuadro 3.2, la combinación de estas fuentes asegura una investigación estructurada que integra tanto el análisis empírico como la revisión teórica, garantizando la generación de conocimiento aplicable y relevante para el sector de la construcción.

Cuadro 3.2. Fuentes de información.

| | Fuente | Información a Obtener | Pregunta Generadora |
|-------------------|--|--|--|
| Primaria | Testimonio de experto | Percepción de expertos sobre la implementación de IA en presupuestación de construcción. Identificación de barreras operativas y culturales para su adopción. Principales retos de la presupuestación. | A1.1, A1.2, A1.3, B1.1, B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| | Casos de estudio documentados en internet | Análisis detallado de proyectos que han implementado IA en presupuestación y sus resultados. Evaluación de precisión y eficiencia en comparación con métodos tradicionales. | B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| | Profesionales del sector de construcción | Datos cuantitativos sobre el nivel de adopción de IA y los beneficios o barreras percibidas. Identificación de tendencias y expectativas en el sector. | A1.1, A1.2, A1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| Secundaria | Artículos académicos y revistas especializadas registrados en internet | Marco teórico sobre IA en construcción, estudios previos, tendencias y avances en el área. Referencias a metodologías de implementación y benchmarking de IA en presupuestación. | A1.1, A1.2, A1.3, B1.1, B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| | Libros y textos académicos | Fundamentos conceptuales y metodológicos en gestión de costos y presupuestación. Estudio de estándares industriales de adopción tecnológica. | A1.1, A1.2, A1.3, B1.1, B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| | Tesis de posgrado | Investigaciones previas sobre IA en presupuestación, aplicaciones específicas y casos documentados. Análisis de metodologías aplicadas en otras industrias y su posible adaptación. | A1.1, A1.2, A1.3, B1.1, B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |
| | Bases de datos académicas y repositorios digitales | Acceso a literatura relevante y análisis de tendencias a nivel global sobre la IA en construcción. Referencias a normativas internacionales y estudios de organismos especializados. | A1.1, A1.2, A1.3, B1.1, B1.2, B1.3, C1.1, C1.2, C1.3, C1.4 |

Nota: Elaboración propia.

3.5 Técnicas y herramientas para la recopilación de datos

Las técnicas y herramientas para la recopilación de datos vienen a ser claves para todo tipo de investigación, ya que permiten obtener información relevante, estructurada y verificable para el análisis y la formulación de los entregables y de las conclusiones. Bajo el contexto de la presente investigación, este factor se vuelve aún más importante, ya que se es necesario triangular las

diferentes fuentes de información, para lograr dar validez a los entregables generados. Además, una adecuada selección de métodos garantizará que los datos recopilados reflejen con precisión la realidad del uso de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Para ello, se han identificado y diseñado estrategias que combinan enfoques cualitativos y cuantitativos, asegurando un análisis integral que abarque tanto la percepción de los profesionales del sector como el estudio de casos reales y antecedentes teóricos.

Asimismo, en esta sección se presentan las técnicas y herramientas seleccionadas, incluyendo las siguientes: (1) la revisión documental, (2) entrevistas semiestructuradas, (3) encuestas estructuradas y (4) estudios de casos. Cada una de estas técnicas se ha diseñado en función de los objetivos específicos del estudio, algunas de carácter exploratorio o descriptivo, y otras orientadas a insumos para la construcción de propuestas. A continuación, se explica cómo estas herramientas se aplican dentro del proceso de investigación y de qué manera contribuyen a obtener datos confiables y pertinentes para el análisis posterior.

3.5.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica, como técnica para la recopilación de datos, tiene como objetivo recopilar, analizar y sintetizar información existente sobre el uso de la Inteligencia Artificial en la gestión de presupuestos en proyectos de construcción. Por ende, se pretende identificar información relevante sobre tendencias, beneficios, limitaciones y estrategias de implementación documentadas en literatura académica, informes técnicos y estudios de caso.

Esta técnica se aplicará, mediante el uso del instrumento de Ficha Bibliográfica (ver Apéndice A), en las primeras fases del estudio, con la finalidad de cimentar la base teórica para la comprensión del problema, y también, para determinar preguntas clave que se pueden utilizar en las entrevistas y encuestas. Puntualmente, se pretende aplicar para:

- **Contextualizar la investigación:** identificar, comprender y esclarecer la integración de IA en presupuestación y gestión de costos.
- **Determinar limitaciones y oportunidades:** analizar hallazgos de investigaciones y experimentaciones previas sobre factores técnicos, operativos y culturales que influyen en la adopción de IA.

- **Establecer relaciones con otras áreas:** examinar y analizar aplicaciones de IA en otras áreas de la gestión de proyectos de construcción, con la finalidad de evaluar si su respectivo proceso de implementación se puede aplicar a la presupuestación.
- **Comparar herramientas existentes:** valorar las soluciones tecnológicas existentes en el mercado y como estas pueden impactar a nivel de eficiencia y precisión de los presupuestos.

Con el objetivo de garantizar una revisión documental estructurada y válida, se definen los siguientes criterios de selección de documentos:

- Fuentes:
 - Artículos científicos indexados en bases de datos como Scopus, Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect y Web of Science.
 - Libros y tesis académicas relevantes al tema de estudio.
 - Estudios de consultoras y firmas de tecnología en IA aplicada a la construcción.
- Criterios de inclusión:
 - Publicaciones entre 2019 y la actualidad para asegurar datos recientes.
 - Relevancia directa con la presupuestación de proyectos de construcción o con la aplicación de IA en la industria AEC (Arquitectura, Ingeniería y Construcción).
 - Documentos revisados por pares o provenientes de fuentes confiables.
- Criterios de exclusión:
 - Estudios no aplicables a presupuestación ni a la industria de la construcción.
 - Información sin respaldo académico o técnico.
 - Documentos con un enfoque exclusivamente teórico sin aplicaciones prácticas.

Con el objetivo de organizar la información recopilada y facilitar el análisis, se plantea que la revisión documental se divida en las siguientes secciones, las cuales están alineadas con las categorías de investigación definidas en el apartado 3.1.:

1. Sección #1: Gestión del costo en proyectos de construcción:

- a. Definición y alcance de la gestión de costos.
- b. Principales desafíos en la presupuestación de proyectos de construcción.

- c. Indicadores de eficiencia y precisión presupuestaria.
- 2. Sección #2: Inteligencia Artificial:**
- a. Concepto y tipologías de IA aplicadas a la industria.
 - b. Beneficios y limitaciones de la IA en procesos empresariales.
 - c. Estrategias de implementación en distintos sectores.
 - d. Buenas prácticas y lecciones aprendidas en adopción tecnológica.
- 3. Sección #3: Aplicaciones de IA en la presupuestación de proyectos de construcción:**
- a. Análisis de herramientas actuales y su impacto en la eficiencia presupuestaria.
 - b. Comparación entre presupuestación tradicional y presupuestación con IA.
 - c. Factores que influyen en la adopción de IA en presupuestación: técnicos, operativos y culturales.
- 4. Sección #4: Estudios de caso y tendencias futuras:**
- a. Ejemplos de aplicación de IA en gestión de costos en proyectos de construcción.
 - b. Oportunidades de mejora y perspectivas futuras de IA en la industria.
 - c. Comparación con otras áreas de la gestión de proyectos para extraer lecciones aplicables.

Esta revisión documental permitirá encontrar relaciones entre las categorías de investigación establecidas en el sentido de que, primero, permitirá entender las prácticas actuales y los desafíos de la presupuestación en proyectos de construcción. Segundo, proporcionará una base teórica sobre los tipos de IA, sus beneficios, limitaciones y estrategias de implementación. Y tercero, contextualizará la industria y su disposición hacia la digitalización y la automatización.

Para una correcta aplicación de esta técnica, se seguirán los siguientes pasos:

1. Búsqueda y recopilación de información: se procede con la selección de las bases de datos y repositorios de documentos, utilización de palabras clave y filtros de búsqueda.
2. Evaluación y selección de documentos: se realiza un análisis de la calidad y relevancia de las fuentes y su respectiva clasificación según las secciones establecidas.

3. Diseño de la guía: definición de criterios específicos para examinar la información recopilada en función de las categorías de investigación.
4. Extracción y sistematización de datos: recopilación de información clave, utilizando la guía de análisis documental para organizar y comparar los hallazgos.
5. Análisis de la información: se identifican patrones, tendencias y relaciones clave. Posteriormente, se resumen los hallazgos en función de su aplicabilidad a la investigación.
6. Elaboración del informe de revisión bibliográfica: se prepara un documento estructurado con los principales hallazgos con su respectiva relación con los objetivos de la investigación y la formulación de preguntas para entrevistas y encuestas.

Con esta herramienta se buscará dar un soporte transversal a todas las categorías de investigación, ya que debido a la naturaleza de la investigación y por ser un tema nuevo, la obtención de datos puede ser limitada con otras técnicas metodológicas. Por lo que esta viene no solo a complementar las demás, sino también a llenar posibles vacíos que pueden surgir a lo largo del proceso de recolección de datos.

3.5.2 Entrevistas semiestructuradas

La aplicación de la técnica de las entrevistas semiestructuradas, a través del instrumento de Guía de entrevista (ver Apéndice B), tiene como objetivo recopilar información cualitativa relevante, no solo sobre la gestión de presupuestos, sino también, sobre la aplicación de Inteligencia Artificial en el proceso de presupuestación en proyectos de construcción. Esto tiene como meta obtener conocimientos profundos sobre percepciones, experiencia y limitaciones que enfrentan los profesionales del sector en la adopción de herramientas basadas en IA.

La utilización de esta herramienta es para:

- Identificar las principales barreras y desafíos que enfrentan los profesionales en la industria de la construcción a la hora de querer implementar Inteligencia Artificial en la gestión de presupuestos.
- Explorar estrategias y soluciones que podrían facilitar la integración de IA en estos procesos.

- Comparar la visión de los expertos en construcción con los hallazgos teóricos y documentales, permitiendo contrastar información y generar un marco de referencia aplicable.
- Analizar relaciones con las categorías de investigación, en especial entre la gestión de costos de construcción con Inteligencia Artificial.

Dentro de los elementos formales para la aplicación de la entrevista, se tiene meta entrevistar entre 10 a 15 profesionales con experiencia en proyectos de construcción, deseablemente con experiencia puntual en presupuestos y conocimientos sobre IA. Asimismo, se priorizará perfiles con roles clave en la toma de decisiones, implementación de tecnología o experiencia en gestión de proyectos.

Las entrevistas seguirán una estructura flexible, combinando preguntas abiertas con una guía temática predefinida. Las temáticas principales son las siguientes:

1. Perfil y experiencia del entrevistado
2. Prácticas actuales de presupuestación / Estado actual de la digitalización en Construcción
3. Conocimiento y percepción sobre IA / Aplicación de IA en presupuestación
4. Barreras para la implementación de IA / Limitaciones y barreras
5. Oportunidades y recomendación / Estrategias y futuro de la IA en Construcción

El procedimiento bajo el cual se aplicarán las entrevistas será el siguiente:

1. **Preparación de la entrevista:** se toma en consideración posibles candidatos provenientes de bases de datos tanto del TEC, CFIA, CAMTIC, del equipo de transformación digital de la UNA y CENFOTEC. Se procede con el envío de la información del estudio. Así como también, identificar profesionales a través de la plataforma LinkedIn. Se opta por una modalidad virtual para la realización de las entrevistas y se prepara la guía de preguntas.
2. **Aplicación de la entrevista:** Inicialmente, por parte del encuestador, se realiza una breve presentación del estudio y consentimiento informado. Se prosigue con el desarrollo de la entrevista siguiendo la estructura predefinida y se registran las respuestas mediante grabación (previa autorización) o notas detalladas.

Cabe destacar que las entrevistas semiestructuradas permiten generar información clave que va a contribuir con las 3 categorías de investigación, ya que:

- Evalúa los principales desafíos que la industria enfrenta en la actualidad.
- Evalúan la eficiencia y precisión de la presupuestación actual, además, de que puntualiza en las limitaciones en el uso de las herramientas tradicionales.
- Profundiza en el nivel de conocimiento y percepción que se tiene de la Inteligencia Artificial, a la vez que identifica barreras y oportunidades de implementación.
- Determina los desafíos a los que se enfrenta la adopción de nuevas tecnologías dentro de la industria de la construcción, así como también, sobre el impacto que estas pueden tener en el proceso constructivo.

3.5.3 Encuestas estructuradas

Las encuestas estructuradas constituyen una de las herramientas principales para la recolección de datos en esta investigación, ver Apéndice C para observar el instrumento de recolección de datos. Su propósito es recopilar información cuantitativa de un grupo representativo de profesionales en la industria de la construcción sobre la percepción, uso y desafíos en la adopción de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de presupuestos de proyectos de construcción.

El objetivo de la aplicación de encuestas estructuradas es obtener datos estandarizados que permitan identificar patrones y tendencias de la percepción sobre la implementación de IA en presupuestación. A través de las respuestas de los encuestados, se podrá evaluar el nivel de conocimiento, la frecuencia de uso (en caso de utilizarse), las ventajas percibidas, los obstáculos existentes y las expectativas respecto a la adopción de estas herramientas tecnológicas.

El paso a paso que seguirá para aplicar los cuestionarios son:

- 1. Elaboración del cuestionario:** Se diseñará un cuestionario estructurado con preguntas cerradas basadas en investigaciones previas y criterios de validez científica. Se incluirán preguntas de opción múltiple, escala de Likert y preguntas dicotómicas para obtener datos precisos.
- 2. Distribución de la encuesta:** Se utilizarán plataformas digitales como Google Forms o Microsoft Forms para la recolección de datos, con difusión a través de correos electrónicos, redes profesionales (LinkedIn) y grupos especializados del sector. Se garantizará el anonimato de los participantes para fomentar respuestas honestas.

- 3. Periodo de recolección:** La encuesta estará abierta por un período de dos semanas, durante el cual se enviarán recordatorios periódicos para maximizar la tasa de respuesta.

Dentro del aporte y relación que va a proveer esta técnica a las categorías (A y C) de investigación se tiene:

- Evalúa los principales retos y desafíos de la industria de la construcción, así como las necesidades de la gestión de proyectos en este ámbito.
- Identifica el nivel actual de implementación de IA y la disposición del sector para su adopción.
- Permite medir la percepción sobre las ventajas y barreras de la IA.
- Identifica qué elementos facilitan o dificultan la implementación de IA.
- Evalúa si la IA mejora la exactitud de las estimaciones.

3.5.4 Estudios de casos

El estudio de casos es una técnica cualitativa fundamental en esta investigación, que permitirá comprender a profundidad la aplicación de IA en la presupuestación de proyectos de construcción. A través del análisis detallado de experiencias reales, se busca identificar factores de éxito, limitaciones y mejores prácticas en la adopción de estas tecnologías.

Con la aplicación de esta técnica se pretende documentar experiencias específicas en el uso de IA en presupuestación, analizando cómo estas tecnologías han impactado la precisión de los costos, la eficiencia operativa y la toma de decisiones en proyectos reales. Se busca extraer conocimientos que puedan servir de referencia para futuras implementaciones en la industria.

El procedimiento para la aplicación de esta técnica es el siguiente:

- 1. Selección de los casos:** Se elegirán entre casos en donde se haya implementado o experimentado con IA en presupuestación de proyectos, asegurando diversidad en términos de tamaño y tipo de construcción. Se buscará incluir, dentro de la medida de lo posible, casos que han logrado una implementación exitosa como aquellos que han enfrentado dificultades en el proceso.
- 2. Recopilación de información:** Esta se basará en revisión documental debido a la limitación de tiempo y acceso a expertos en el área en el país. Por lo tanto, se basará

en análisis de informes técnicos y documentación relevante para comprender el impacto de la IA en la presupuestación.

3. **Registro de hallazgos:** Se documentarán los datos obtenidos en fichas de casos estructuradas (ver Apéndice D), con información sobre contexto, implementación, desafíos y resultados. Se categorizarán los hallazgos según su impacto en la eficiencia y precisión de la presupuestación.
4. **Análisis de datos:** Los datos obtenidos serán organizados en categorías temáticas mediante codificación cualitativa. Se analizarán patrones y tendencias dentro de cada caso y se compararán con los hallazgos obtenidos en otras técnicas de recolección de datos. El análisis permitirá identificar elementos clave en la implementación de IA, sus beneficios y las barreras que enfrentan las organizaciones. Los resultados obtenidos servirán como insumo para la formulación de estrategias de mejora en la adopción de IA en la presupuestación de proyectos de construcción.

Los estudios de casos aportan a las categorías (B y C) de investigación ya que permitirán:

- Analizar cuál es el alcance de la gestión de costos de construcción.
- Identificar métodos de estimación de costos, su nivel de eficiencia y precisión, y su contribución al éxito del proyecto.
- Comprender como la gestión de costos de construcción ha evolucionado con la integración de nuevas tecnologías.
- Identificar las tecnologías y estrategias efectivas en la aplicación de IA en presupuestación.
- Contribuir a comprender la viabilidad y el impacto de IA en la industria de construcción.
- Comprender como la IA puede facilitar a la hora de la toma de decisiones.
- Identificar retos y lecciones aprendidas.

3.6 Procesamiento y productos de la investigación

El presente apartado detalla el enfoque metodológico que se seguirá para procesar la información recolectada a través de los distintos instrumentos de investigación, esto con el fin de cumplir los objetivos específicos y, por ende, el objetivo general del estudio. Además, se

establecen con claridad los productos esperados de cada fase del análisis, así como las técnicas específicas que se utilizarán para el tratamiento de la información tanto cualitativa como cuantitativa.

Los productos generados contribuyen a la generación de conocimiento relevante y aplicable sobre la implementación de herramientas de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Por su parte, se procura asegurar la validez de los hallazgos mediante una estrategia de triangulación de datos y un enfoque mixto, que garantice la coherencia entre los datos recolectados, su análisis y las conclusiones generadas.

3.6.1 *Productos de la investigación*

En esta sección se presentan los productos que se derivan del análisis de los datos recopilados, alineados con cada uno de los objetivos específicos de la investigación. Se detallan sus características, el alcance de su desarrollo, las fuentes de información que los sustentan, así como las técnicas metodológicas empleadas para su obtención. Este desglose permite visualizar de forma clara cómo cada producto contribuye de manera directa al logro de los objetivos propuestos y a la generación de conocimiento práctico y aplicable en torno al uso de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción.

Cuadro 3.3. Relación de objetivos, productos de la investigación, fuentes de información y técnicas de investigación.

| Objetivo Específico | Producto Esperado | Desglose del Producto | Alcance | Técnicas de análisis | Formas de Presentación de Resultados |
|--|--|--|---|--|--|
| Objetivo 1. Analizar las prácticas actuales de Inteligencia Artificial aplicadas a la elaboración de presupuestos de proyectos de construcción, mediante la revisión documental y el estudio de casos, identificando los niveles de precisión y eficiencia requeridos por la industria, para detectar oportunidades de mejora, establecer criterios de validación y orientar una futura estrategia de implementación. | Informe detallado sobre prácticas de IA actuales, destacando su impacto y áreas de oportunidad. | Aplicabilidad, ventajas y desventajas. Matriz comparativa de los enfoques identificados. | Identificación, clasificación y síntesis de las metodologías de IA aplicadas en presupuestación de proyectos de construcción. | Triangulación de información, síntesis temática, análisis comparativo, clasificación por categorías. | Prosa analítica y tablas de resultados de encuestas/entrevistas. |

| Objetivo Específico | Producto Esperado | Desglose del Producto | Alcance | Técnicas de análisis | Formas de Presentación de Resultados |
|---|--|---|--|--|--|
| Objetivo 2. Analizar las limitaciones técnicas, operativas y culturales que afectan la adopción de herramientas de Inteligencia Artificial en la gestión de costos, a través de una revisión teórica y entrevistas semiestructuradas con profesionales del sector, para identificar las barreras clave y proponer mecanismos que faciliten su integración efectiva en la industria de la construcción. | Análisis de limitaciones que presentan las herramientas de IA en la presupuestación. | Identificación de barreras técnicas, operativas y culturales. Comparación con estudios previos. | Evaluación de barreras y desafíos en la implementación de IA en presupuestación de proyectos. | Análisis de contenido, triangulación de perspectivas, síntesis categorial, contrastación con literatura previa. | Prosa analítica y tablas de resultados de encuestas/entrevistas. |
| Objetivo 3. Extraer lecciones aplicables a la presupuestación a partir de un análisis comparativo entre casos de éxito en la aplicación de Inteligencia Artificial en distintas áreas de la gestión de proyectos de construcción. | Informe de análisis comparativo de casos de éxito en la aplicación de Inteligencia Artificial en la gestión de proyectos de construcción. | Factores internos y externos que afectan la implementación. Comparación de experiencias y buenas prácticas. | Análisis comparativo de experiencias exitosas en la adopción de IA en diferentes áreas de la gestión de proyectos. | Análisis comparativo de casos, síntesis de lecciones aprendidas, identificación de patrones, triangulación de hallazgos. | Prosa analítica, tablas de resultados de encuestas/entrevistas y tablas comparativas de casos. |
| Objetivo 4. Diseñar una propuesta estratégica para la integración de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, que integre una hoja de ruta práctica con estrategias concretas, basado en los hallazgos teóricos y de campo, para orientar su adopción en la industria. | Marco de referencia con una propuesta de hoja de ruta para la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. | Estrategias de adopción, roadmap de implementación, factores clave de éxito. Comparación con experiencias previas. | Desarrollo de estrategias aplicables para la implementación efectiva de IA en la presupuestación de proyectos. | Síntesis integradora, análisis estratégico, diseño de marco conceptual, redacción estructurada del roadmap. | Prosa analítica, tablas de resultados de encuestas/entrevistas y tablas comparativas de casos. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 3.3 permite visualizar de forma ordenada cómo cada producto responde de manera directa a los objetivos específicos planteados, así como las técnicas de análisis aplicadas para su obtención y las formas de presentar los resultados. El enfoque adoptado combina procedimientos

como la triangulación de hallazgos, la síntesis temática, el análisis comparativo de casos y la interpretación de patrones, lo que facilita contrastar información y extraer conclusiones robustas.

Además, se han empleado distintos formatos de presentación —prosa analítica, tablas comparativas, gráficos y diagramas— para organizar y comunicar los resultados de manera clara y accesible, asegurando que los hallazgos sean comprensibles y aplicables para la industria.

De esta manera, cada producto no solo cumple con el objetivo específico al que responde, sino que también aporta insumos prácticos y validados para el desarrollo de un marco de referencia sólido en la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. La combinación de técnicas de análisis y diversidad de presentaciones fortalece la calidad de la interpretación y garantiza que las conclusiones se fundamenten en un tratamiento sistemático de la información.

3.6.2 Técnicas de procesamiento

En esta sección se explican las técnicas que se van a utilizar para analizar la información recopilada en la investigación. La idea es dejar claro qué se va a hacer con los datos, cómo se va a procesar la información de cada instrumento y cómo esto va a permitir generar los productos definidos en la sección anterior (ver Figura 3.1.). Por su parte, se describe el propósito de cada técnica, el tipo de datos que va a trabajar, las herramientas que se van a usar y, sobre todo, cómo cada una ayuda a cumplir los objetivos específicos y, con ello, el objetivo general. Además, se incluye la triangulación como parte fundamental del proceso, ya que permite validar los hallazgos desde distintas fuentes y asegurar resultados sólidos y coherentes.

Las técnicas de procesamiento de información serán las siguientes:

1. Análisis de contenido

Esta técnica se emplea para interpretar y desglosar la información cualitativa ya sistematizada a partir de las entrevistas, estudios de caso y revisión documental. El análisis se orienta a identificar relaciones, convergencias y divergencias entre las categorías de investigación, contrastando los hallazgos empíricos con el marco teórico.

Se aplicará un proceso de codificación analítica, seguido de la triangulación de resultados entre las distintas fuentes de información, con el fin de validar la coherencia de los hallazgos.

Asimismo, se realizarán síntesis temáticas y matrices comparativas que permitan visibilizar patrones, conexiones y diferencias relevantes.

Los resultados se presentarán mediante prosa analítica y tablas comparativas, de manera que la interpretación sea clara y respaldada por evidencias.

- Técnicas de análisis empleadas: triangulación, síntesis temática, matrices comparativas, contrastación teórico-empírica.
- Formatos de presentación de resultados: prosa interpretativa y tablas.
- Objetivos que apoya: 1, 2 y 3.
- Producto relacionado: Informe sobre prácticas actuales, Análisis de limitaciones y Análisis comparativo de casos de éxito.

2. Análisis comparativo y de casos

Esta técnica combina el análisis comparativo general con el análisis detallado de casos específicos, con el objetivo de identificar similitudes, diferencias y factores clave en la presupuestación de proyectos, tanto en metodologías tradicionales como en aquellas que integran Inteligencia Artificial.

En el nivel general, se definirán criterios de comparación como precisión, eficiencia, escalabilidad y nivel de adopción, lo que permitirá contrastar enfoques y determinar cuáles generan mejores resultados en diferentes contextos.

En el nivel específico de casos, se seleccionarán experiencias reales previamente documentadas en la investigación (Apéndice D) y se agruparán según variables como:

- Precisión y confiabilidad de las estimaciones de costos.
- Reducción de tiempos en la elaboración de presupuestos.
- Impacto en la rentabilidad del proyecto.
- Aceptación de la IA por parte del equipo de trabajo.
- Barreras organizacionales y técnicas en la implementación.

Se construirá una matriz comparativa (Apéndice E) con los hallazgos de cada caso respecto a los indicadores establecidos, lo que permitirá identificar patrones comunes, diferencias significativas y lecciones aprendidas. El análisis final se realizará mediante comparación cruzada, contrastando los resultados con la literatura revisada y con los hallazgos de otras técnicas de procesamiento, garantizando así una triangulación metodológica robusta.

- Instrumentos asociados: Apéndices B, D y E.
- Herramientas: Excel, Google Sheets.
- Objetivos que apoya: 1, 2 y 3.
- Productos relacionados: Informe de casos de éxito, análisis de limitaciones e informe de prácticas actuales.

3. Análisis de tendencias

El análisis de tendencias se utilizará para entender cómo ha evolucionado la adopción de IA en presupuestación en los últimos años, tanto desde la percepción del sector como desde la evidencia documental. Esta técnica permitirá graficar patrones y visualizar cómo ha cambiado la precisión, el nivel de uso o la resistencia del sector a lo largo del tiempo. Además, esta es clave para justificar la hoja de ruta que se propone al final.

- Instrumentos asociados: Apéndices A, C y E.
- Herramientas: Excel, Google Sheets.
- Objetivos que apoya: 1 y 4.
- Producto relacionado: Informe de prácticas actuales y marco de referencia con hoja de ruta.

4. Diagrama de Ishikawa

Esta herramienta se aplicará para organizar de forma visual las causas principales que dificultan la adopción de IA en la presupuestación. Se categorizarán las barreras identificadas en las entrevistas, encuestas y casos en grupos como técnicos, operativos, culturales, económicos y legales. Esta visualización facilitará entender cómo interactúan estas barreras y dónde enfocar soluciones.

- Instrumentos asociados: Apéndices B, C y D.
- Herramientas: Draw.io, Lucidchart, Excel.
- Objetivo que apoya: 2.
- Producto relacionado: Análisis de limitaciones.

5. Triangulación de datos

La triangulación será una etapa clave en el análisis. Se usará para cruzar los resultados obtenidos de distintos instrumentos y asegurar que los hallazgos sean consistentes, sólidos y bien

fundamentados. Este paso es importante porque valida lo que se ha encontrado desde distintas perspectivas (teórica, técnica, práctica y perceptual), y da mayor peso a las conclusiones que se presentarán.

- Instrumentos asociados: Todos (A, B, C, D y E).
- Herramientas: Excel, Google Sheets, NVivo.
- Objetivos que apoya: 1, 2, 3 y 4.
- Productos relacionados: Todos los productos esperados.

Luego de haber detallado en la sección anterior las técnicas de procesamiento que se utilizarán, es importante cerrar este capítulo con una visión clara y estructurada del proceso completo. A continuación, se presenta un desglose fase por fase con las actividades principales que deben realizarse en esta investigación. Este esquema permite ver cómo se conectan los instrumentos, las técnicas de análisis, los productos esperados y el cumplimiento del objetivo general. La idea es dejar claro el camino metodológico y facilitar su implementación.

A lo largo del proceso metodológico se han definido cinco fases que permiten organizar el desarrollo de la investigación desde la recolección de datos hasta la entrega de resultados aplicables. Cada fase tiene un propósito específico, instrumentos asociados, técnicas de análisis determinadas y productos esperados claramente vinculados a los objetivos.

1. Fase 1: Recolección de información

Objetivo: Obtener información relevante, tanto documental como de campo, que permita construir una base sólida para el análisis y los hallazgos de la investigación.

Actividades principales:

- **Revisión documental y técnica (Apéndice A):**
 - Buscar y seleccionar literatura científica, técnica y normativa relacionada con la aplicación de IA en presupuestación.
 - Clasificar la información según temas clave: metodologías, precisión, barreras, impacto, adopción, etc.
- **Aplicación de entrevistas (Apéndice B):**

- Seleccionar perfiles estratégicos del sector (consultores, gerentes, profesionales técnicos).
- Coordinar y aplicar entrevistas semiestructuradas, enfocadas en prácticas actuales, limitaciones y visión sobre la IA.
- **Distribución de encuestas (Apéndice C):**
 - Diseñar y aplicar el cuestionario estructurado para profesionales del sector construcción.
 - Recolectar datos sobre experiencia, percepción, adopción de IA y barreras observadas.
- **Desarrollo de casos de estudio (Apéndice D):**
 - Identificar casos relevantes (éxito y/o fracaso) en la implementación de IA.
 - Aplicar la guía de estudio para documentar factores técnicos, humanos, organizacionales y contextuales.
- **Construcción de matriz comparativa (Apéndice E):**
 - Completar matriz con información recolectada en los casos.
 - Clasificar variables: precisión, eficiencia, barreras, condiciones de adopción, resultados obtenidos.

2. Fase 2: Procesamiento y análisis de la información

Objetivo: Analizar la información obtenida utilizando técnicas adecuadas para transformar los datos en hallazgos relevantes.

Actividades principales:

- **Aplicar análisis de contenido:**
 - Codificar los datos cualitativos (entrevistas, casos, documentos).
 - Identificar patrones sobre precisión, eficiencia, percepción, desafíos, estrategias, etc.
- **Aplicar análisis comparativo:**
 - Contrastar metodologías tradicionales vs. IA.
 - Comparar experiencias de diferentes casos para identificar factores clave y lecciones aprendidas.

- **Aplicar análisis de tendencias:**
 - Graficar la evolución de la adopción de IA, precisión alcanzada, aceptación del sector, cambios normativos.
 - Identificar hacia dónde se dirige la industria.
- **Construir el diagrama de Ishikawa:**
 - Clasificar las barreras encontradas en categorías (técnicas, operativas, culturales, económicas, legales).
 - Visualizar las causas raíz que dificultan la implementación de IA en presupuestación.
- **Aplicar triangulación de datos:**
 - Cruzar los resultados de las distintas técnicas e instrumentos.
 - Validar hallazgos, reforzar patrones sólidos y ajustar interpretaciones si es necesario.

3. Fase 3: Validación y síntesis

Objetivo: Confirmar la consistencia, validez y aplicabilidad de los hallazgos, integrando múltiples perspectivas y fuentes.

Actividades principales:

- Comparar resultados obtenidos en entrevistas, encuestas, casos y bibliografía.
- Confirmar coincidencias y analizar divergencias para refinar las interpretaciones.
- Priorizar información más sólida y coherente con el contexto del sector construcción.
- Construir un esquema sintético que vincule los hallazgos con cada objetivo específico.

4. Fase 4: Elaboración de productos esperados

Objetivo: Construir los entregables definidos para cada objetivo específico de la investigación.

Productos y pasos asociados:

- **Informe de prácticas actuales (Objetivo 1):**

- Sistematizar la información teórica, técnica y empírica sobre el uso actual de IA.
- Comparar metodologías, eficiencia, precisión y beneficios observados.
- **Análisis de limitaciones (Objetivo 2):**
 - Clasificar y explicar las barreras encontradas, apoyado por el diagrama de Ishikawa.
 - Integrar percepciones del sector y evidencia concreta de las limitaciones.
- **Informe de casos de éxito (Objetivo 3):**
 - Documentar experiencias reales de implementación de IA.
 - Extraer lecciones aprendidas y factores que permitieron buenos resultados.
- **Marco de referencia con hoja de ruta (Objetivo 4):**
 - Proponer estrategias concretas para facilitar la adopción de IA en presupuestación.
 - Basar la hoja de ruta en los hallazgos más relevantes y validados.

5. Fase 5: Cumplimiento del objetivo general

Objetivo: Proponer una hoja de ruta práctica, validada y aplicable para implementar IA en la presupuestación de proyectos de construcción.

Actividades principales:

- Integrar todos los productos en una narrativa lógica, clara y coherente.
- Redactar recomendaciones dirigidas a profesionales, tomadores de decisiones y actores del sector.
- Enfatizar los factores clave de éxito, las condiciones necesarias y los riesgos a considerar.
- Presentar un marco de referencia que pueda ser aplicado, adaptado y escalado por la industria.

Capítulo 4 Análisis de Resultados

Este capítulo presenta los principales hallazgos obtenidos a partir del análisis de la información recopilada mediante entrevistas semiestructuradas, encuestas en línea, revisión documental y estudios de caso. Los resultados se organizan conforme a las tres categorías definidas en el marco metodológico: (A) gestión de costos, (B) inteligencia artificial en proyectos de construcción y (C) integración de IA en la presupuestación de obras.

El desarrollo se organiza considerando los objetivos específicos planteados y las preguntas generadoras definidas en el capítulo anterior, de forma que los hallazgos puedan vincularse con el entregable correspondiente. Esta organización busca mantener la coherencia entre el proceso metodológico y la presentación de resultados, facilitando la trazabilidad y la verificación del grado de cumplimiento de los objetivos propuestos.

Para el tratamiento de la información se aplicaron técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo, tales como elaboración de tablas, tablas comparativas y análisis de contenido, entre otros recursos gráficos y esquemáticos.

El propósito de esta sección no es ofrecer conclusiones definitivas, sino proporcionar un análisis crítico y organizado que sirva de sustento para la propuesta que se expone en el capítulo siguiente.

4.1 Categoría A: Proyectos de construcción

La Categoría A del presente estudio se orientó a comprender los desafíos estructurales, las necesidades clave y las principales tendencias que caracterizan actualmente a los proyectos de construcción. Esta categoría cumple una función fundamental como punto de partida del análisis, ya que permite contextualizar las condiciones generales en las que operan los proyectos, así como las transformaciones recientes en el entorno constructivo.

Para abordar esta categoría, se tomó en consideración las tres subcategorías específicas que se definieron en el Capítulo 3, y es mediante estas subcategorías que se estructura el análisis de la presente sección:

- A1.1. Desafíos de los proyectos de construcción
- A1.2. Necesidades operativas, técnicas y estratégicas
- A1.3. Tendencias observadas en prácticas, metodologías y entorno del sector

A continuación, se presentan los hallazgos organizados por subcategoría y técnica, seguidos de un análisis preliminar consolidado que sintetiza los principales hallazgos integrados para esta categoría.

4.1.1 Resultados de la revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica realizada para la Categoría A buscó establecer un panorama actualizado que permitiera entender los problemas recurrentes que enfrenta la industria de la construcción, las áreas críticas que requieren atención y las proyecciones de cambio que comienzan a perfilar el futuro de la gestión de proyectos constructivos. En esta sección se presentan los descubrimientos organizados en tres apartados: primero, se describen los principales desafíos que afectan el desarrollo eficiente de los proyectos; posteriormente, se identifican las necesidades prioritarias que surgen como respuesta a dichos problemas; y finalmente, se exponen las tendencias que delinear el rumbo hacia el que evolucionan las mejores prácticas de la industria.

Cabe señalar que las referencias utilizadas en este capítulo no corresponden a citas textuales puntuales, sino que hacen referencia a ideas centrales identificadas en los documentos analizados. En este sentido, el propósito es destacar los aportes conceptuales más relevantes para la investigación, sin que resulte necesario precisar un número de página específico, dado que la intención es subrayar lineamientos generales y no transcripciones literales.,

4.1.1.1 Desafíos en proyectos de construcción

La revisión bibliográfica identificó múltiples desafíos que persisten en la ejecución de proyectos de construcción, afectando tanto su desempeño operativo como su éxito estratégico. Por una parte, uno de los principales retos señalados es el control ineficaz de los costos y plazos durante la fase de ejecución, especialmente en proyectos de infraestructura pública. El autor Guzmán Sánchez (2023), evidenció que la falta de procedimientos estandarizados y herramientas de control adecuadas conduce a desviaciones presupuestarias y retrasos, afectando la calidad final de las obras. Por lo tanto, este problema se presenta como un desafío recurrente que demanda atención inmediata en la planificación y el seguimiento de los proyectos.

Por otro lado, resalta la resistencia cultural a la adopción de nuevas tecnologías, como la metodología BIM, dentro de las organizaciones de construcción. Por su parte, este fenómeno limita la modernización de los procesos constructivos, comprometiendo la eficiencia, la colaboración

interdisciplinaria y la trazabilidad de la información en los proyectos. Como resultado, la resistencia al cambio se configura así como un obstáculo estructural para la evolución de la industria (Gómez-Valdés et al., 2023).

Adicionalmente, la literatura reciente subraya que los criterios tradicionales de éxito en los proyectos de construcción, limitados al cumplimiento de costo, tiempo y calidad, resultan insuficientes para responder a las exigencias actuales de la industria. En su lugar, se plantea la necesidad de incorporar dimensiones más amplias que integren el valor estratégico, la sostenibilidad y los impactos sociales generados por los proyectos. Estos factores no solo enriquecen la evaluación del desempeño, sino que permiten a los equipos de gestión de proyectos alinear sus prácticas con expectativas más integrales de los *stakeholders* y con los objetivos de desarrollo sostenible del sector (Aa et al., 2018a).

Finalmente, aunque el estudio de Bardu & Sandu (2020) se centra en la gestión de costos, identifica un desafío transversal relevante para los proyectos de construcción: la necesidad de asegurar la viabilidad financiera a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Esto debido a que la falta de una integración efectiva entre el control financiero y la planificación estratégica incrementa el riesgo de desalineación entre los objetivos del proyecto y su ejecución real.

En conjunto, estos desafíos revelan que la industria de la construcción enfrenta no solo problemas operativos, sino también transformaciones estructurales que exigen replanteamientos en la forma de planificar, ejecutar y medir el éxito de los proyectos.

4.1.1.2 Necesidades en proyectos de construcción

La revisión bibliográfica también permitió identificar diversas necesidades prioritarias que emergen como respuesta a los desafíos actuales en la ejecución de proyectos de construcción. Primeramente, una necesidad fundamental es la implementación de procedimientos metodológicos claros y sistemáticos para el control de costos y plazos. La ausencia de procesos formales de seguimiento y evaluación en proyectos públicos contribuye significativamente a desviaciones y sobrecostos. Se destaca, además, la urgencia de adoptar herramientas de planificación y control que garanticen mayor disciplina en la gestión de los recursos y tiempos (Guzmán Sánchez, 2023).

De manera complementaria, Gómez-Valdés et al. (2023) señalan la necesidad de fortalecer la capacitación de los profesionales del sector en el uso de nuevas tecnologías, especialmente en la metodología BIM. La formación técnica insuficiente y la carencia de habilidades digitales dentro

de los equipos de proyecto limitan la capacidad de las organizaciones para evolucionar hacia esquemas de gestión más eficientes y colaborativos. Por tanto, la actualización de competencias se plantea entonces como un elemento clave para enfrentar los retos de la transformación digital en la construcción.

Asimismo, existe una necesidad creciente de redefinir los criterios de éxito en los proyectos de construcción, incorporando aspectos como la sostenibilidad, el valor estratégico y la satisfacción de los *stakeholders*. Esta visión implica una transformación en los marcos de gestión tradicionales, orientándolos hacia enfoques más holísticos que respondan a las demandas contemporáneas de responsabilidad social y generación de valor a largo plazo. Estos elementos emergen de la revisión realizada y reflejan una tendencia ampliamente reconocida en la literatura y en las prácticas del sector, lo que evidencia que el éxito de un proyecto no puede seguir evaluándose únicamente en función del costo, el tiempo y la calidad, sino que debe incorporar variables más amplias vinculadas al impacto social y ambiental.

Estas necesidades no solo apuntan a mejoras operativas, sino que revelan una presión estructural sobre el sector de la construcción para modernizar sus prácticas, adaptarse a contextos más complejos y responder a expectativas más amplias de la sociedad y el entorno económico actual.

4.1.1.3 Tendencias futuras de los proyectos de construcción

Una de las principales tendencias identificadas es la transformación digital de la industria, impulsada por la adopción progresiva de metodologías como BIM. Según Gómez-Valdés et al. (2023), el uso de BIM no solo mejora la eficiencia en la planificación y ejecución de proyectos, sino que también promueve una colaboración más estrecha entre los diferentes actores involucrados, optimiza la gestión de la información y facilita la toma de decisiones en todas las etapas del ciclo de vida del proyecto. Como resultado, esta tendencia sugiere un movimiento continuo hacia entornos de trabajo más integrados y digitalizados.

Asimismo, los estudios recientes evidencian que los criterios tradicionales de éxito en proyectos de construcción, centrados en costo, tiempo y calidad, ya no son suficientes. En su lugar, se propone una visión más amplia que incluya el desempeño ambiental, la satisfacción del cliente, la gestión del aprendizaje y el conocimiento y el control financiero, aspectos que reflejan el impacto real y sostenible de los proyectos en su entorno operativo y social (Beshah et al., 2024).

Aunque el estudio de Guzmán Sánchez (2023) se centra principalmente en problemáticas actuales, su énfasis en la necesidad de procesos sistemáticos de control también sugiere una tendencia hacia la profesionalización y estandarización de las prácticas de gestión en proyectos públicos, en línea con modelos de gestión más modernos y estructurados.

En conjunto, las tendencias detectadas apuntan a una transformación profunda en la industria de la construcción, donde la innovación tecnológica, la responsabilidad social y el enfoque estratégico se consolidan como elementos esenciales para el éxito sostenible de los proyectos futuros.

4.1.2 Resultados de la encuesta estructurada

Para comprender los principales retos asociados a los proyectos de construcción, se aplicó un cuestionario estructurado a profesionales del sector. En esta sección se presentan los hallazgos vinculados a la Categoría A (Proyectos de construcción), analizando las respuestas asociadas a los desafíos, necesidades y tendencias del sector. En el cuadro 4.1. se observa la relación de las preguntas de la encuesta respecto a las subcategorías de investigación.

Cuadro 4.1. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|------------|---|---------------------------|
| P8 | ¿Cuáles son los principales desafíos en proyectos de construcción? | Desafíos |
| P9 | ¿Cómo impactan estos desafíos en los resultados del proyecto? | Desafíos |
| P10 | ¿Qué necesidades considera prioritarias para mejorar la ejecución de los proyectos de construcción? | Necesidades |
| P12 | ¿Cómo espera que evolucione el uso de tecnologías en la industria en los próximos 5 años? | Tendencias |

Nota: Elaboración propia.

4.1.2.1 Desafíos en proyectos de construcción

Esta sección profundiza sobre los hallazgos encontrados en las preguntas relacionados con la subcategoría de desafíos en proyectos de construcción. Los resultados con los siguientes:

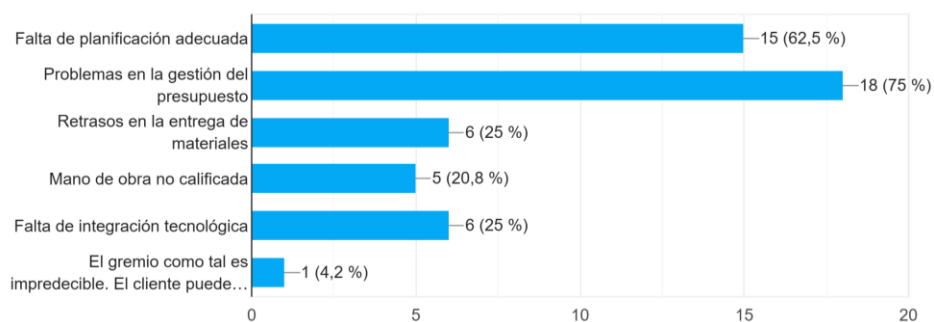
P8. ¿Cuáles son los principales desafíos en proyectos de construcción?

La primera pregunta, analizada en esta categoría, tiene como objetivo identificar los principales desafíos percibidos por los profesionales encuestados en la ejecución de proyectos de construcción. Las respuestas fueron procesadas aplicando análisis estadístico descriptivo con el

apoyo de Excel y *Google Sheets*; y los datos se representaron gráficamente para facilitar la interpretación.

En total, se recopilaron 24 respuestas, en su mayoría con múltiples opciones seleccionadas. Como se observa en la Figura 4.1, el desafío más frecuentemente señalado fue la gestión del presupuesto (18 menciones), seguido por la falta de una planificación adecuada (15 menciones). Otros desafíos destacados fueron los retrasos en la entrega de materiales (6), la falta de integración tecnológica (6) y la mano de obra no calificada (5).

Figura 4.1. Percepción de los principales desafíos en proyectos de construcción.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Además de estas opciones cerradas, se recibieron aportes cualitativos a través de respuestas abiertas. Una de ellas destaca una dimensión humana relevante al afirmar que: *"El gremio como tal es impredecible, y mantener la motivación puede ser el mayor reto."* Este tipo de aportes refleja que, junto con los desafíos técnicos y logísticos, existen elementos subjetivos y organizacionales que también impactan en la ejecución de los proyectos.

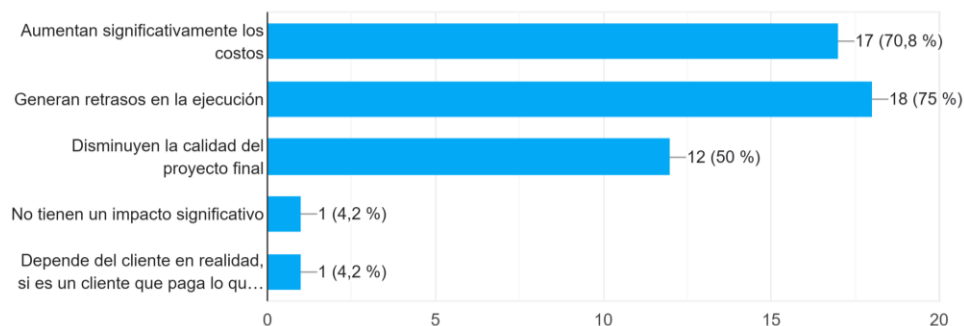
Los hallazgos de esta pregunta aportan evidencia concreta para la subcategoría "Desafíos" dentro de la Categoría A: Proyectos de construcción, permitiendo construir un diagnóstico inicial desde la percepción de los actores involucrados en el sector. Los hallazgos de esta pregunta permiten comprender los puntos críticos que afectan la ejecución de proyectos en contextos similares al estudiado, y representan insumos clave para el diagnóstico general que sustenta esta investigación.

En resumen, la mayoría de los profesionales identifican la gestión del presupuesto como el principal desafío en la ejecución de proyectos de construcción, seguido por la falta de planificación adecuada, mientras que también se reconocen problemas logísticos, tecnológicos y humanos que inciden en el desempeño de los proyectos.

P9. ¿Cómo impactan estos desafíos en los resultados del proyecto?

Esta pregunta buscó profundizar en los efectos que los desafíos previamente identificados generan sobre los resultados tangibles de los proyectos. De las 24 respuestas analizadas, la mayoría indica que los desafíos impactan directamente en los dos pilares más críticos: el tiempo y el costo. La respuesta más frecuente fue “*Generan retrasos en la ejecución*” (18 menciones), seguida de “*Aumentan significativamente los costos*” (17 menciones). Además, 12 participantes consideraron que también *disminuyen la calidad del proyecto final*, lo que refleja una visión integral de cómo los problemas de planificación, presupuesto o ejecución afectan los resultados. En la Figura 4.2. se observa los principales desafíos que impactan en esta subcategoría.

Figura 4.2. Percepción de los principales desafíos que impactan en la rentabilidad y plazos de los proyectos.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Un porcentaje marginal de respuestas afirmó que los desafíos no tienen un impacto significativo (1 mención), y otra respuesta abierta amplió la perspectiva al señalar:

“Depende del cliente en realidad, si es un cliente que paga lo que se necesita y entiende, entonces el manejo de equipo puede ser más un tema de salud mental y habilidades blandas que algo técnico.”

Esta afirmación sugiere que, en ciertos casos, la gestión emocional y las relaciones con el cliente también pueden mediar los efectos de los desafíos técnicos, incorporando una dimensión humana al análisis de resultados. Este estudio refuerza la importancia de abordar los desafíos desde un enfoque integral, considerando tanto los factores técnicos como los elementos relacionales y contextuales que pueden influir en el rendimiento de los proyectos.

En conclusión, los desafíos en la ejecución de proyectos afectan de manera prioritaria los plazos (con retrasos significativos) y los costos (incrementos sustanciales), siendo estos los dos pilares más vulnerables según la percepción de los encuestados. Asimismo, un número considerable de participantes señaló que dichos problemas también reducen la calidad final de las obras, lo que evidencia un impacto integral en el desempeño de los proyectos. Estos hallazgos resaltan la necesidad de abordar las dificultades desde un enfoque técnico y humano, incorporando la gestión de relaciones y habilidades blandas como factores que pueden mitigar sus efectos.

4.1.2.2 Necesidades en proyectos de construcción

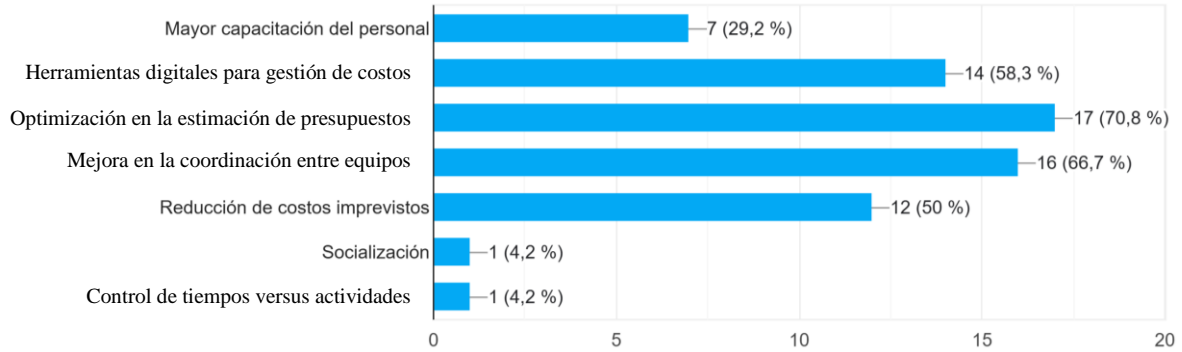
A continuación, se describen los principales hallazgos encontrados respecto a las necesidades en proyectos de construcción. Estos son los siguientes:

P10. ¿Cuáles considera que son las principales necesidades en la ejecución de proyectos de construcción?

Esta pregunta permitió identificar qué aspectos son considerados prioritarios por los participantes para mejorar la ejecución de proyectos en el contexto actual. Se ofreció un listado de opciones cerradas, permitiendo seleccionar hasta tres alternativas. Las respuestas fueron consolidadas y visualizadas mediante un gráfico que muestra la frecuencia de selección de cada necesidad.

Tal como se observa en la Figura 4.3, la optimización en la estimación de presupuestos fue señalada como la necesidad más urgente, con 17 menciones. Le siguen la mejora en la coordinación entre equipos (16 menciones) y la incorporación de herramientas digitales para la gestión de costos (14 menciones), lo cual evidencia una fuerte preocupación por la eficiencia financiera y la integración tecnológica como ejes de mejora.

Figura 4.3. Percepción de las principales necesidades en la ejecución de proyectos de construcción.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Otras necesidades relevantes fueron la reducción de costos imprevistos (12 menciones) y la mayor capacitación del personal (7 menciones), lo que refleja una conciencia creciente sobre la importancia del desarrollo de competencias dentro del equipo de trabajo. También se registraron menciones aisladas a temas como el control de tiempos y la socialización de procesos, los cuales, aunque menos frecuentes, podrían estar vinculados a contextos específicos o experiencias particulares de los encuestados.

Este análisis permite identificar áreas estratégicas de intervención y fortalece el enfoque de mejora continua en los procesos constructivos, al resaltar las percepciones compartidas por actores con experiencia directa en el desarrollo de proyectos.

Por consiguiente, el principal resultado es que la optimización en la estimación de presupuestos emerge como la prioridad más urgente para mejorar la ejecución de proyectos, seguida muy de cerca por la mejora en la coordinación entre equipos y la incorporación de herramientas digitales para la gestión de costos. Estos resultados reflejan que la eficiencia financiera y la integración tecnológica son los ejes centrales de mejora percibidos por los participantes. Asimismo, la presencia de necesidades como la reducción de costos imprevistos y la capacitación del personal subraya la importancia de fortalecer tanto las capacidades técnicas como las competencias humanas para lograr un desempeño más sólido en el sector.

4.1.2.3 Tendencias futuras de los proyectos de construcción

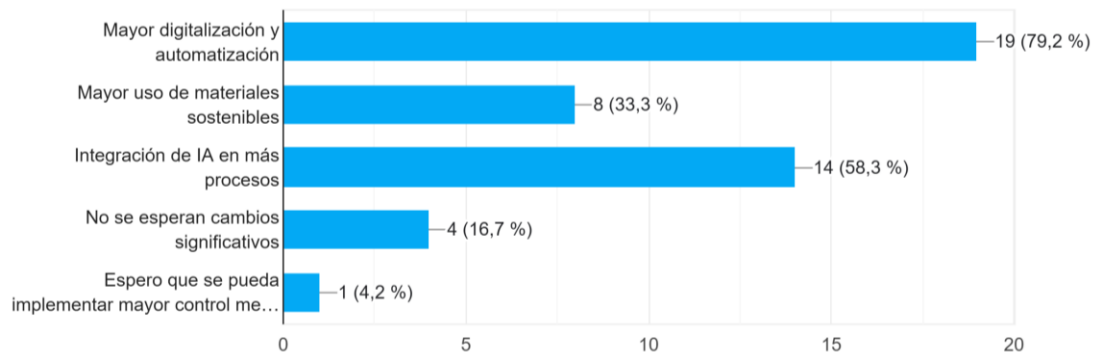
En cuanto a las tendencias futuras en proyectos de construcción, a continuación, se mostrarán los principales hallazgos obtenidos de la encuesta estructurada.

P12. ¿Cómo espera que evolucione la industria de la construcción en los próximos 5-10 años?

La última pregunta de esta categoría buscó explorar las expectativas que tienen los profesionales del sector sobre la evolución tecnológica de la industria en el mediano plazo. Esta percepción es relevante para entender el nivel de apertura hacia nuevas soluciones digitales, y el contexto futuro en el que podrían implementarse herramientas como la inteligencia artificial.

De las 24 respuestas analizadas, como se observa en la figura 4.4., la opción más frecuente fue “*Mayor digitalización y automatización*” (19 menciones), seguida por “*Integración de IA en más procesos*” (14 menciones), lo cual indica una alta expectativa de transformación tecnológica progresiva. También fue destacada la “*mayor utilización de materiales sostenibles*” (8 menciones), lo que sugiere una creciente conciencia ambiental en paralelo al avance tecnológico.

Figura 4.4. Percepción de cómo se espera que evolucione la industria de la construcción en los próximos 5-10 años.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Un grupo reducido de participantes expresó escepticismo o expectativas más moderadas. Cuatro personas respondieron: “*No se esperan cambios significativos*”, y una respuesta abierta expresó una visión crítica al señalar:

“Espero que se pueda implementar mayor control mediante herramientas tecnológicas, sin embargo, la construcción tradicional ha sido por mucho tiempo líder y pienso que la base se va a mantener por más tiempo... es más el acoplarse a la esencia que cambiar de manera radical.”

Este tipo de observaciones cualitativas sugiere que, aunque la mayoría percibe un futuro con alta incorporación tecnológica, aún existen posturas cautelosas o con una visión más evolutiva que disruptiva sobre el cambio en el sector.

Los hallazgos de esta pregunta aportan una base perceptiva que resulta clave para anticipar el ritmo de adopción de tecnologías emergentes, así como para identificar posibles puntos de resistencia o realismo práctico entre los actores del sector.

En síntesis, el principal resultado es que existe una alta expectativa de transformación tecnológica en la industria, liderada por la mayor digitalización y automatización (19 menciones) y la integración de la IA en más procesos (14 menciones), acompañada por un interés creciente en la utilización de materiales sostenibles (8 menciones). No obstante, también se identifican posturas más cautelosas, que anticipan una evolución gradual y no disruptiva, resaltando la necesidad de que la innovación tecnológica se acople a la esencia tradicional del sector. Estos hallazgos permiten prever tanto el potencial de adopción de nuevas soluciones como los focos de resistencia que podrían influir en su implementación.

4.1.3 Resultados entrevistas semiestructuradas

La presente sección expone los principales hallazgos obtenidos a partir de la aplicación de las entrevistas semiestructuradas con preguntas diseñadas para abordar la Categoría A. En particular, se analizaron las percepciones de los entrevistados respecto a los desafíos, errores comunes, necesidades prioritarias y tendencias futuras en la gestión de proyectos de construcción. Para recolectar esta información, en el cuadro 4.2. se utilizaron las siguientes preguntas específicas:

Cuadro 4.2. Relación de preguntas de entrevistas con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|----------------|---|---------------------------|
| G1 – P1 | ¿Cuáles considera son los principales desafíos en los proyectos de construcción hoy día? | Desafíos |
| G1 – P2 | ¿Cuáles son los principales problemas o errores comunes en la planificación y ejecución de proyectos de construcción? | Desafíos |

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|----------------|--|---------------------------|
| G1 – P3 | Enumere las 3 principales necesidades en el área | Necesidades |
| G1 – P4 | ¿Cuáles considera serán las tendencias de la gestión de proyectos de construcción en los próximos 10 años? | Tendencias |

Nota: Elaboración propia.

De esta forma, el análisis busca identificar patrones recurrentes, contrastar perspectivas y evidenciar tendencias relevantes que permitan comprender mejor el contexto actual y futuro de la industria de la construcción.

4.1.3.1 Desafíos en proyectos de construcción

A partir de las respuestas obtenidas, se identificó que los principales desafíos en los proyectos de construcción giran en torno a la planificación, la gestión de recursos y la coordinación efectiva entre los distintos actores involucrados. La mayoría de los entrevistados coincidió en señalar que la falta de planificación adecuada desde las etapas iniciales impacta negativamente el desempeño del proyecto en fases posteriores, lo cual se traduce en sobrecostos, atrasos y conflictos contractuales.

De igual forma, se evidenció la preocupación por la ineficiencia en el control de cambios durante la ejecución, aspecto que, según varios participantes, genera incertidumbre en los presupuestos y disminuye la confiabilidad de los flujos de trabajo. Además, se destacó que la carencia de herramientas de seguimiento actualizadas limita la capacidad de anticipar desviaciones de tiempo y costo de manera oportuna.

En consecuencia, la gestión de recursos humanos y materiales emergió como otro de los retos principales, particularmente en proyectos de alta complejidad o en contextos donde los proveedores no garantizan tiempos de entrega consistentes. Finalmente, aunque en menor proporción, algunos entrevistados mencionaron que la resistencia al cambio en el uso de tecnologías digitales representa un obstáculo adicional que ralentiza la modernización de los procesos constructivos.

4.1.3.2 Necesidades en proyectos de construcción

En relación con las principales necesidades actuales en el sector de la construcción, las respuestas de los entrevistados reflejan tres grandes ejes de atención: la optimización de procesos de planificación, la integración efectiva de tecnologías digitales y el fortalecimiento de las capacidades técnicas del recurso humano.

La optimización de los procesos de planificación fue señalada como una necesidad prioritaria, especialmente en términos de establecer metodologías más estructuradas para la definición de alcances, programación de actividades y asignación de recursos. En este sentido, varios participantes recalcaron la urgencia de mejorar la precisión de los cronogramas y de establecer controles de avance más dinámicos.

Por otra parte, la incorporación de tecnologías digitales, tales como plataformas de gestión de proyectos, software de control de costos y sistemas de modelado BIM, fue ampliamente reconocida como un requisito indispensable para modernizar las prácticas constructivas. Sin embargo, los entrevistados advirtieron que la adopción tecnológica no debe centrarse únicamente en la adquisición de herramientas, sino también en su adecuada implementación y en la capacitación de los usuarios.

Finalmente, el fortalecimiento de las competencias técnicas del personal de obra y de oficina fue destacado como una necesidad transversal. Los entrevistados señalaron que los proyectos requieren profesionales capaces de adaptarse a entornos tecnológicos en evolución, manejar información de manera eficiente y tomar decisiones basadas en datos actualizados y confiables.

4.1.3.3 Tendencias futuras de los proyectos de construcción

Respecto a las tendencias esperadas en la gestión de proyectos de construcción durante los próximos años, se evidenció un consenso generalizado en torno a la creciente importancia de la digitalización, la sostenibilidad y la eficiencia operativa como ejes de transformación del sector.

La digitalización fue mencionada como un elemento clave que definirá la competitividad de las empresas. Los entrevistados señalaron que el uso intensivo de herramientas digitales, como, por ejemplo, modelos BIM avanzados, sistemas de control de costos en tiempo real y plataformas de colaboración en la nube, pasará de ser una ventaja competitiva para convertirse en un requisito básico para participar en proyectos de mayor complejidad.

De forma complementaria, la sostenibilidad emergió como una tendencia ineludible. Se destacó la necesidad de integrar prácticas de construcción sostenible, tanto desde el punto de vista del diseño como de la ejecución, para atender las exigencias regulatorias y la presión de los mercados internacionales. Algunos participantes subrayaron que las certificaciones ambientales y

la medición de la huella de carbono serán aspectos cada vez más relevantes en la planificación y ejecución de proyectos.

Por último, la búsqueda de mayor eficiencia operativa se proyecta como un objetivo estratégico. En este sentido, se mencionó que la automatización de procesos, la adopción de metodologías de construcción industrializada y el uso de análisis predictivos para la gestión de riesgos contribuirán a mejorar la rentabilidad y la resiliencia de los proyectos.

4.1.4 Análisis de la Categoría A – Proyectos de Construcción

El análisis preliminar de la Categoría A integró los resultados obtenidos mediante entrevistas semiestructuradas, encuestas estructuradas y revisión bibliográfica, utilizando técnicas de análisis cualitativo como la categorización temática, reducción de datos y codificación axial, según lo establecido en el capítulo 3. Este proceso permitió no solo identificar patrones comunes, sino también destacar particularidades y contrastes entre las distintas fuentes de información, enriqueciendo la comprensión de los desafíos, necesidades y tendencias actuales de los proyectos de construcción en el contexto costarricense.

4.1.4.1 Desafíos en proyectos de construcción

Las entrevistas con profesionales del sector identificaron como uno de los principales desafíos estructurales la fragmentación entre actores involucrados en las distintas etapas del proyecto. Esta desconexión se traduce en retrabajos, pérdida de tiempo y errores técnicos, especialmente en la transición entre diseño, presupuestación y ejecución. Las encuestas reforzaron este hallazgo, señalando como frecuente la falta de alineación entre departamentos y contratistas.

Desde la revisión bibliográfica, autores como Barde & Sandu (2020) señalan que este fenómeno no es exclusivo de Costa Rica, sino una característica persistente de la industria global, atribuida a la estructura tradicionalmente compartimentada del sector.

En contraste, algunos encuestados, especialmente de empresas más grandes, indicaron que ya se han logrado ciertos avances en la integración de procesos, gracias al uso de plataformas colaborativas, lo que revela una tensión entre los avances tecnológicos disponibles y su adopción efectiva por parte del mercado.

Otro desafío recurrente es la falta de estandarización en procesos constructivos y gestión de información, evidenciada tanto en entrevistas como en encuestas. Se identifican procedimientos

duplicados, variabilidad en los criterios de medición, y ausencia de formatos comunes para control de avances. La revisión bibliográfica señala que esta falta de estandarización afecta directamente la calidad de la gestión de proyectos, al dificultar la trazabilidad y el control de costos.

Finalmente, una barrera estructural señalada por todos los instrumentos fue la resistencia al cambio, particularmente en lo referente a la adopción de nuevas tecnologías o metodologías. Aunque las herramientas existen, su implementación se ve limitada por factores culturales, falta de capacitación o temor a lo desconocido.

4.1.4.2 Necesidades en proyectos de construcción

A partir del análisis por codificación, las necesidades detectadas en los proyectos de construcción pueden agruparse en tres niveles: operativo, organizacional y estratégico.

Desde el punto de vista operativo, tanto encuestas como entrevistas destacan la necesidad de herramientas que permitan una mejor integración entre disciplinas y áreas funcionales. Se menciona, por ejemplo, la dificultad para compartir información entre diseño, presupuesto y ejecución, lo que genera retrabajos y fallas de coordinación. Este punto también fue identificado en la literatura, donde se plantea la urgencia de avanzar hacia entornos colaborativos sostenidos por flujos de información interoperables (Gómez-Valdés et al., 2023).

A nivel organizacional, las fuentes cualitativas revelaron la necesidad de mejorar la comunicación interna y la claridad en roles y responsabilidades, especialmente en proyectos que involucran múltiples contratistas o actores externos. Esta necesidad también se asocia con la carencia de metodologías estructuradas de seguimiento y control.

En el plano estratégico, se identifica como una prioridad fortalecer las capacidades del talento humano. Por su parte, las encuestas muestran una amplia coincidencia en cuanto a la necesidad de formación continua en herramientas digitales, gestión de proyectos y análisis de datos, mientras que las entrevistas apuntan a la necesidad de crear una cultura organizacional más abierta a la innovación y al trabajo colaborativo. La bibliografía respalda este hallazgo al señalar que la falta de formación especializada y visión estratégica son factores críticos que limitan el desempeño general de los proyectos.

4.1.4.3 Tendencias futuras de los proyectos de construcción

Una de las tendencias más señaladas tanto en entrevistas como en la bibliografía es el avance, aún desigual, hacia la adopción de metodologías colaborativas como BIM. Aunque

algunas empresas ya han comenzado a implementar esta metodología, otras aún operan con métodos tradicionales, lo cual genera una brecha tecnológica creciente entre distintos actores del mercado.

Las encuestas revelaron que la adopción de herramientas digitales de control y planificación ha aumentado, pero que su uso sigue siendo limitado a funciones básicas como cronogramas y presupuestos. Solamente una minoría reportó integrar datos entre plataformas o realizar análisis predictivos, lo cual muestra que la transformación digital se encuentra aún en una etapa inicial en muchos proyectos.

Otra tendencia emergente es el interés por incorporar criterios de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida desde fases tempranas de los proyectos. Sin embargo, este enfoque todavía no está sistematizado, y su aplicación depende en gran medida del tipo de cliente y del tamaño del proyecto.

Finalmente, se identifica una transformación en el perfil profesional requerido, donde se valora cada vez más la capacidad de análisis, la alfabetización digital y las competencias para el trabajo interdisciplinario. Esta tendencia está alineada con la literatura, que señala un cambio en el rol tradicional del ingeniero hacia funciones más integradoras.

4.1.4.4 Síntesis del análisis

En el Cuadro 4.3. se puede observar una síntesis de todos los hallazgos encontrados:

Cuadro 4.3. Síntesis del análisis de la Categoría A.

| Subcategoría | Principales hallazgos |
|--------------------|---|
| Desafíos | <ul style="list-style-type: none"> • Falta de planificación desde etapas tempranas. • Ineficiencia en el control de cambios y recursos. • Fragmentación entre actores del proyecto. • Ausencia de estandarización en procesos y control. • Resistencia al cambio tecnológico y metodológico. |
| Necesidades | <ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos sistemáticos de planificación y control. • Integración efectiva de tecnologías digitales. • Fortalecimiento de competencias del recurso humano. • Mejora de comunicación y roles organizacionales. • Cultura abierta a la innovación. • |

| Subcategoría | Principales hallazgos |
|-------------------|--|
| Tendencias | <ul style="list-style-type: none"> • Digitalización progresiva del sector (uso de BIM, plataformas colaborativas, automatización). • Incorporación de criterios de sostenibilidad y ciclo de vida. • Evolución del perfil profesional (alfabetización digital, capacidades integradoras). |

Nota: Elaboración propia.

4.2 Categoría B: Gestión del costo en proyectos de construcción

La Categoría B de este estudio se enfocó en analizar el proceso de presupuestación actual en proyectos de construcción, específicamente en contextos donde no se utiliza inteligencia artificial. Su propósito fue caracterizar las herramientas, metodologías y rutinas actualmente empleadas en el desarrollo de presupuestos, así como identificar sus principales limitaciones, riesgos y oportunidades de mejora.

Para abordar esta categoría se definieron tres subcategorías:

- B1.1 Alcance de la gestión de costos,
- B1.2 Eficiencia presupuestaria, y
- B1.3 Precisión presupuestaria.

A continuación, se presentan los resultados por subcategoría, seguidos de un análisis preliminar que consolida los hallazgos y examina sus causas estructurales.

4.2.1 Resultados de la revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica correspondiente a la Categoría B se enfocó en analizar aspectos clave de la gestión de costos en proyectos de construcción, abordando específicamente el alcance de la gestión de costos, la eficiencia presupuestaria y la precisión en las estimaciones y control de costos.

El análisis se basó en fuentes académicas recientes y relevantes que permitieron identificar prácticas, procesos críticos y factores determinantes para lograr una gestión de costos más efectiva y estratégica en el sector de la construcción.

La información recopilada se organiza a continuación conforme a las tres subcategorías descritas anteriormente: alcance de la gestión de costos (B1.1), eficiencia presupuestaria (B1.2) y precisión presupuestaria (B1.3).

4.2.1.1 Alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción

La revisión bibliográfica evidenció que el alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción abarca un conjunto de procesos fundamentales que deben ejecutarse de manera estructurada para garantizar el éxito del proyecto.

Según Villegas & Rincón de Parra (2011), la gestión de costos no debe limitarse a la elaboración de presupuestos iniciales, sino que comprende también la planificación detallada de los costos, la definición de una línea base contra la cual medir el desempeño, el monitoreo continuo de los costos reales frente a los planificados y la implementación de acciones correctivas oportunas. Por lo tanto, esta visión integral refuerza la idea de que la gestión de costos debe estar presente en todas las fases del ciclo de vida del proyecto.

Asimismo, la gestión de costos debe entenderse como un proceso estratégico que impacta no solo en el cumplimiento de los objetivos financieros del proyecto, sino también, en la competitividad de la organización a largo plazo. Además, se destaca que la gestión efectiva de los costos es un factor crítico para lograr márgenes de rentabilidad adecuados y para optimizar el uso de los recursos disponibles (Bardu & Sandu, 2020).

Por su parte, Guzmán Sánchez (2023) enfatiza la importancia de incorporar procedimientos de control de costos durante la fase de ejecución, de forma que se pueda garantizar el cumplimiento de los presupuestos iniciales y evitar desviaciones significativas. Su propuesta metodológica plantea que el control sistemático de costos debe ser una actividad permanente a lo largo del proyecto y no una revisión puntual.

Finalmente, los autores Okereke et al. (2022b) amplían el concepto del alcance de la gestión de costos al vincularlo con el desempeño estratégico de las organizaciones de construcción. Según su estudio, una gestión de costos bien estructurada no solo mejora la eficiencia operativa del proyecto, sino que también fortalece la posición competitiva de la empresa en el mercado.

En conjunto, las fuentes revisadas coinciden en que el alcance de la gestión de costos debe ser amplio, abarcando desde la planificación inicial hasta el control y cierre del proyecto, y que su adecuada implementación constituye un pilar fundamental para el éxito organizacional y de cada proyecto individual.

4.2.1.2 Eficiencia presupuestaria

La eficiencia presupuestaria en proyectos de construcción fue otro de los temas centrales abordados en la revisión bibliográfica, destacándose como un factor crítico para optimizar el uso de recursos y maximizar los resultados obtenidos con los costos incurridos. Por su parte, Guzmán Sánchez (2023) plantea que la eficiencia presupuestaria depende en gran medida de la capacidad de implementar procedimientos de control sistemático de costos y plazos durante la fase de ejecución. Además, la adopción de instrumentos de monitoreo y evaluación en tiempo real permite detectar desviaciones de manera temprana y aplicar medidas correctivas oportunas, reduciendo así la pérdida de recursos y aumentando la capacidad de cumplir con los presupuestos establecidos.

En paralelo, la eficiencia presupuestaria en proyectos de construcción va más allá de una correcta planificación; requiere un monitoreo continuo del desempeño financiero utilizando herramientas como el *Earned Value Management*. Esta metodología proporciona una comparación objetiva entre el valor real generado y el valor planificado, entregando indicadores clave para la toma de decisiones estratégicas (Luna, 2025).

Desde un enfoque más estratégico, la eficiencia presupuestaria en la gestión de costos contribuye directamente a la competitividad de las organizaciones constructoras. Por lo tanto, una ejecución presupuestaria eficiente no solo asegura el éxito del proyecto individual, sino que también, posiciona a la empresa como un actor confiable y capaz en el mercado, mejorando su desempeño estratégico a largo plazo (Okereke et al., 2022b).

Finalmente, se destaca que la eficiencia presupuestaria debe contemplar la capacidad de anticipar variaciones económicas, de optimizar los recursos disponibles y de minimizar las pérdidas asociadas a sobrecostos o mala gestión de fondos. En este sentido, una gestión de costos eficiente actúa como un elemento mitigador de riesgos financieros en los proyectos de construcción (Bardu & Sandu, 2020).

En síntesis, las fuentes revisadas coinciden en que la eficiencia presupuestaria constituye una dimensión indispensable de la gestión de costos, ya que permite maximizar el valor obtenido por cada unidad monetaria invertida, mejorar la predictibilidad financiera y fortalecer la sostenibilidad económica de los proyectos.

4.2.1.3 Precisión presupuestaria

La revisión bibliográfica destacó que la precisión presupuestaria es un componente esencial para garantizar la viabilidad técnica y financiera de los proyectos de construcción, así como para fortalecer la credibilidad de las organizaciones ante sus clientes e interesados. Mayo-Alvarez et al. (2022) sostienen que dicha precisión depende de la correcta definición de la línea base de costos y plazos, ya que constituye el punto de referencia indispensable para evaluar el desempeño. Además, enfatizan que el uso del Análisis de Valor Ganado (EVM) permite monitorear continuamente las variaciones entre lo planificado y lo ejecutado, generando indicadores objetivos como el Índice de Desempeño de Costos (CPI) y el Índice de Desempeño de Plazos (SPI). Estos indicadores aportan evidencia cuantitativa que facilita la toma de decisiones estratégicas y contribuye a mantener el proyecto dentro de los parámetros establecidos.

Okereke et al. (2022b) enfatizan que una estimación de costos precisa no solo impacta en la ejecución eficiente del proyecto, sino que también incide directamente en la satisfacción del cliente y en la reputación organizacional. La capacidad de prever costos de manera realista mejora la toma de decisiones estratégicas y reduce los riesgos asociados a sobrecostos imprevistos.

Asimismo, la falta de precisión en las etapas iniciales de presupuestación puede tener consecuencias significativas durante la ejecución, generando la necesidad de reprogramaciones, adendas presupuestarias y comprometiendo la calidad de los resultados finales. Su propuesta metodológica subraya la importancia de validar continuamente las proyecciones de costos a partir del avance físico y financiero del proyecto (Guzmán Sánchez, 2023).

Aunque Bardu & Sandu (2020) se centran más en la eficiencia general de la gestión de costos, también reconocen que una planificación imprecisa o basada en supuestos débiles puede derivar en desviaciones que comprometen tanto la rentabilidad del proyecto como su percepción de éxito.

En conjunto, las fuentes analizadas coinciden en que alcanzar altos niveles de precisión presupuestaria requiere no solo técnicas de estimación robustas, sino también procesos de control y verificación constantes a lo largo de la ejecución del proyecto, lo cual permite corregir desviaciones a tiempo y asegurar el cumplimiento de los objetivos financieros.

4.2.2 Resultados de encuesta estructurada

Esta sección presenta los hallazgos derivados de las respuestas al cuestionario estructurado, específicamente aquellas relacionadas con la Categoría B: Gestión del costo en proyectos de construcción. Las preguntas seleccionadas se vinculan con dos subcategorías clave definidas en el Cuadro 4.4.: eficiencia y precisión presupuestarias. A través del análisis de estas preguntas se busca identificar prácticas actuales, percepciones y oportunidades de mejora relacionadas con el control y optimización de los costos en proyectos constructivos.

Cuadro 4.4. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|------------|---|---------------------------|
| P11 | ¿Qué estrategias utiliza su empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos? | Eficiencia presupuestaria |
| P15 | ¿Ha notado mejoras tangibles en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA? | Precisión presupuestaria |
| P14 | ¿Qué factores aumentarían su confianza en el uso de IA para presupuestación? | Precisión presupuestaria |

Nota: Elaboración propia.

4.2.2.1 Eficiencia presupuestaria

Respecto al tema de la eficiencia presupuestaria, a continuación, se hará una recapitulación de los principales descubrimientos según la encuesta estructurada.

P11. ¿Qué estrategias utiliza su empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos?

Esta pregunta tuvo como propósito identificar las prácticas más comunes utilizadas por las empresas para reducir el impacto de riesgos financieros en el proceso de presupuestación. Las respuestas, de tipo cerradas y con opción múltiple, reflejan la diversidad de enfoques adoptados por los encuestados en su entorno laboral.

Como se observa en la Figura 4.5, la estrategia más mencionada fue la implementación de revisiones continuas y auditorías (14 menciones), seguida por el análisis de costos históricos (12 menciones). Ambas estrategias sugieren un enfoque basado en el control continuo y la experiencia previa, que busca corregir desviaciones de manera oportuna.

Figura 4.5. Percepción de las principales estrategias que utilizan las empresas para mitigar riesgos financieros en los presupuestos.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

El uso de herramientas digitales y las reservas para contingencias fueron igualmente valoradas (10 menciones cada una), lo que indica que, aunque estas prácticas no son todavía dominantes, sí están presentes como complemento a los métodos más tradicionales.

Estos resultados permiten observar que la eficiencia presupuestaria se busca principalmente a través de mecanismos internos de verificación y aprendizaje, más que por una automatización intensiva del proceso. La incorporación de herramientas digitales aparece como una estrategia emergente, en proceso de consolidación.

Este análisis aporta evidencia sobre las medidas percibidas como más efectivas para mantener el control financiero en los proyectos, y ayuda a perfilar el grado de madurez organizacional frente al manejo del riesgo presupuestario.

En conclusión, el principal resultado es que las empresas priorizan estrategias tradicionales de control financiero, destacando las revisiones continuas y auditorías, así como el análisis de costos históricos, mientras que el uso de herramientas digitales y las reservas para contingencias se perciben como prácticas complementarias en proceso de consolidación.

4.2.2.2 Precisión presupuestaria

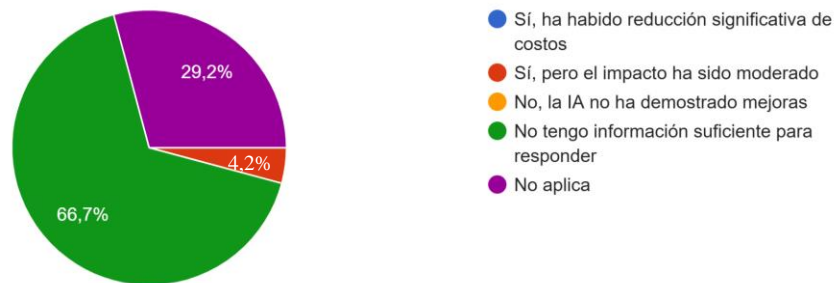
Por su parte, en esta sección se van a exponer los principales hallazgos encontrados relacionados con precisión presupuestaria.

P15. ¿Ha notado mejoras tangibles en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA?

Esta pregunta tuvo como objetivo evaluar si los encuestados han experimentado mejoras concretas en el rendimiento de los proyectos tras la aplicación de herramientas de inteligencia artificial, específicamente en relación con los costos y los tiempos. Las respuestas a esta pregunta permiten explorar la percepción actual sobre el impacto real de estas tecnologías en el entorno constructivo.

Tal como se observa en la Figura 4.6, la gran mayoría de participantes respondió “*No tengo información suficiente para responder*” (16 menciones), lo cual refleja una baja exposición práctica al uso de IA en contextos reales o una posible falta de claridad sobre sus efectos medibles. Siete personas respondieron “*No aplica*”, lo que sugiere que en sus organizaciones aún no se han implementado este tipo de herramientas.

Figura 4.6. Apreciación de las principales mejoras tangibles en costos y tiempo en proyectos donde se ha aplicado IA.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Solo una respuesta indicó que *sí se habían notado mejoras*, aunque calificó el impacto como “moderado”. Este hallazgo refuerza la hipótesis de que el uso de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción se encuentra aún en una etapa incipiente, al menos en el contexto de los participantes consultados.

Aunque los resultados no permiten identificar una tendencia concluyente sobre beneficios tangibles, sí ofrecen un indicio claro del nivel de familiaridad actual con estas tecnologías, lo que será clave al momento de interpretar el potencial de adopción y las estrategias de validación abordadas en otras categorías.

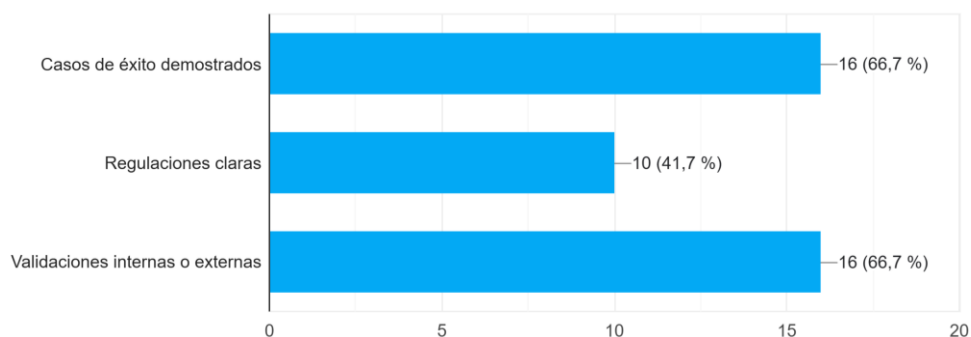
En conclusión, el principal resultado es que la mayoría de los participantes no cuenta con experiencia o información suficiente para evaluar mejoras derivadas del uso de inteligencia artificial en proyectos de construcción, evidenciando que su implementación sigue siendo incipiente y con bajo grado de familiaridad en el contexto estudiado.

P14. ¿Qué factores aumentarían su confianza en el uso de IA para presupuestación?

Esta pregunta tuvo como objetivo explorar las condiciones bajo las cuales los profesionales del sector se sentirían más confiados al incorporar inteligencia artificial en los procesos de presupuestación. Se ofreció un conjunto de opciones para respuesta múltiple, permitiendo priorizar los aspectos percibidos como más relevantes.

Los resultados reflejan una marcada preferencia por factores que garanticen transparencia, validación y evidencia práctica. Como se muestra en la Figura 4.7, las dos opciones más seleccionadas fueron “*Casos de éxito demostrados*” y “*Validaciones internas o externas*”, ambas con 16 menciones. Esto indica que la confianza en la IA no depende solamente de su disponibilidad tecnológica, sino de su comprobación empírica y su legitimidad en entornos reales.

Figura 4.7. Percepción de los principales factores que aumentarían la confianza en el uso de IA para presupuestación.



Nota: Imagen extraída de *Google Sheets*.

Por otro lado, la opción “*Regulaciones claras*” obtuvo 10 menciones, lo cual sugiere que también existen preocupaciones sobre el marco normativo y ético que debe acompañar el uso de estas herramientas en contextos críticos como la estimación de costos.

Este análisis permite identificar barreras perceptivas que podrían estar limitando una adopción más acelerada de herramientas basadas en inteligencia artificial, y resalta la importancia de generar condiciones de seguridad técnica, normativa y profesional para favorecer su integración progresiva.

En conclusión, el principal resultado es que la confianza para incorporar inteligencia artificial en la presupuestación depende principalmente de la existencia de casos de éxito comprobados y validaciones internas o externas, complementados por un marco regulatorio claro que respalde su uso seguro y legítimo.

Los resultados presentados en esta sección permiten responder de forma clara a dos de las tres preguntas generadoras definidas para la Categoría B. En primer lugar, se identificaron diversas estrategias que las empresas aplican actualmente para mitigar riesgos financieros y optimizar la eficiencia presupuestaria (B1.2), lo que evidencia un enfoque práctico orientado a la mejora continua. Entre estas estrategias, destacan las revisiones sistemáticas, el análisis histórico de costos y la incorporación de herramientas tecnológicas en fases específicas del presupuesto.

En segundo lugar, también se abordaron los factores que afectan la precisión presupuestaria (B1.3), entre los cuales se encuentran la calidad de la información de entrada, la experiencia del equipo y la disponibilidad de herramientas que permitan validar o ajustar las estimaciones. Estos elementos resultan determinantes para minimizar desviaciones y fortalecer la trazabilidad de los costos en proyectos constructivos.

Cabe aclarar que, si bien la pregunta relacionada con el alcance de la gestión de costos (B1.1) no fue cubierta directamente a través del cuestionario, ha sido tratada de forma complementaria mediante los otros instrumentos utilizados en esta investigación, como los estudios de caso y la revisión bibliográfica.

En conjunto, esta sección aporta una perspectiva actualizada y empírica sobre las prácticas presupuestarias vigentes, y ayuda a identificar tanto las fortalezas como las oportunidades de mejora que existen en la gestión de costos dentro del sector construcción.

4.2.3 Resultados entrevistas semiestructuradas

Esta sección presenta los principales hallazgos derivados de la aplicación de entrevistas semiestructuradas orientadas a explorar la Categoría B: Gestión del costo en proyectos de construcción. El objetivo fue analizar las percepciones de los entrevistados respecto al alcance actual de la gestión de costos, las estrategias utilizadas para mejorar la eficiencia en presupuestación y los factores que afectan la precisión de los presupuestos.

Para recolectar esta información, se utilizaron las siguientes preguntas específicas, que se pueden visualizar en el Cuadro 4.5.:

Cuadro 4.5. Relación de preguntas de entrevista con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|-----------------|--|---|
| G1 – P5 | Describe el proceso típico de presupuestación en su organización. | Gestión de costos |
| G1 – P10 | ¿Cómo se realiza el control de costos durante la ejecución de los proyectos? | Gestión de costos |
| G1 – P11 | ¿Existe algún mecanismo formal para la mejora continua en presupuestación? | Gestión de costos y eficiencia presupuestaria |
| G1 – P6 | ¿Qué software y herramientas utilizan para la estimación de costos? | Eficiencia presupuestaria |
| G1 – P7 | ¿Cuáles son los principales problemas o errores comunes en la presupuestación? | Precisión presupuestaria |
| G1 – P8 | En una escala del 1 al 5, califique la precisión de los presupuestos realizados en su empresa. | Precisión presupuestaria |
| G1 – P9 | ¿Qué porcentaje de los proyectos experimenta desviaciones presupuestarias? | Precisión presupuestaria |

Nota: Elaboración propia.

4.2.3.1 Alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción

Uno de los principales temas abordados en las entrevistas fue el alcance real que tiene la gestión de costos en los proyectos de construcción. El análisis de las respuestas obtenidas revela que, aunque todos los participantes reconocen la importancia de esta función desde las etapas iniciales del proyecto, la práctica cotidiana muestra una implementación parcial y, en muchos casos, desarticulada.

Por un lado, se observa que la mayoría de los entrevistados asocian la gestión de costos principalmente con la fase de presupuestación inicial, la cual incluye la lectura de planos, especificaciones, análisis de cantidades, y consulta de precios actualizados. Esta etapa es ejecutada generalmente mediante el uso de herramientas como Excel, software de estimación como EDGE, *SAGE Estimating*, Presto o incluso apoyo en plataformas como ChatGPT. No obstante, algunos

participantes indicaron que la continuidad del proceso hacia fases posteriores del proyecto (como la ejecución y el control de costos) no siempre está claramente definida ni integrada a nivel organizacional.

Además, se evidenció una gran variabilidad en los procedimientos internos entre empresas. Mientras algunos entrevistados mencionan el uso de flujos estructurados y controles semiformales, otros admiten que el seguimiento presupuestario depende en gran medida de la iniciativa individual o del conocimiento empírico acumulado. Por ejemplo, uno de los participantes señaló que en su organización el proceso se basa en “un histórico de presupuestos anteriores y experiencia del equipo”, lo cual, si bien puede ser funcional, limita la capacidad de trazabilidad, estandarización y mejora continua.

En cuanto al control de costos durante la ejecución, algunos participantes mencionaron herramientas como Bluebeam, AutoCAD o Presto, pero no se describen mecanismos consistentes de revisión o ajuste del presupuesto conforme avanzan las obras. Este hallazgo coincide con la percepción expresada de uno de los entrevistados, quien afirma que “el presupuesto inicial muchas veces se pierde o es muy difícil de manejar durante la ejecución”, lo cual sugiere una desconexión entre las fases del proyecto y una visión fragmentada del proceso presupuestario.

Finalmente, aunque algunos entrevistados indicaron contar con “mecanismos de mejora continua”, estos no siempre están formalizados ni documentados, lo cual limita su impacto y sostenibilidad. En general, puede concluirse que el alcance de la gestión de costos está todavía centrado en la fase de estimación inicial y carece de una integración plena a lo largo del ciclo de vida del proyecto, especialmente en lo que respecta al control, retroalimentación y toma de decisiones estratégicas en tiempo real.

4.2.3.2 Eficiencia presupuestaria

La eficiencia presupuestaria fue otro de los ejes analizados durante las entrevistas, con el objetivo de identificar las prácticas, herramientas y procesos que permiten optimizar el uso de recursos en la elaboración de presupuestos. A partir de las respuestas obtenidas, se evidencian diferencias significativas entre las organizaciones en cuanto al nivel de sistematización y aprovechamiento de recursos tecnológicos.

Por un lado, todos los participantes mencionan el uso de herramientas digitales como Excel, AutoCAD, Presto, Bluebeam, Revit, Planswift o Estimating EDGE para apoyar el proceso de estimación. No obstante, se observa que el uso de estas herramientas no garantiza por sí solo una mayor eficiencia, ya que en varios casos el proceso sigue dependiendo en gran medida de la experiencia del profesional que realiza la estimación. Algunos participantes incluso mencionan complementar su trabajo con plataformas web o apoyo de asistentes digitales como ChatGPT, lo cual refleja una exploración incipiente de soluciones innovadoras.

Además, la eficiencia presupuestaria parece estar limitada por la falta de planificación detallada y la ausencia de procesos estandarizados, tal como lo señalaron varios entrevistados. Esta carencia genera retrabajo, aumenta el margen de error y reduce la capacidad de respuesta ante cambios en el proyecto. Según uno de los participantes, la eficiencia se ve afectada por la “comunicación deficiente entre los interesados y la falta de conocimiento integral del proyecto desde la etapa de estimación”, lo cual evidencia que la eficiencia presupuestaria está estrechamente ligada a la calidad del diseño organizacional y la colaboración interna.

De forma complementaria, otro encuestado señala que, aunque existen intentos de optimizar el presupuesto, muchas veces las decisiones no responden a una estrategia clara de eficiencia, sino a limitaciones de tiempo, recursos o presión por cerrar costos rápidamente. Esto se traduce en prácticas que priorizan la inmediatez sobre el análisis profundo, afectando la calidad final del presupuesto y, por ende, la toma de decisiones a nivel estratégico.

Asimismo, al ser consultados sobre mecanismos de mejora continua, la mayoría de los entrevistados no mencionan procesos formales ni indicadores específicos para evaluar la eficiencia del presupuesto a lo largo del tiempo. Aunque algunos expresan interés en mejorar, esto depende más del compromiso personal o del liderazgo de un equipo que de una estructura organizativa clara y sostenida.

En resumen, si bien existen herramientas y conocimientos técnicos disponibles, la eficiencia presupuestaria en el sector construcción sigue siendo un desafío estructural, estrechamente vinculado con la calidad de los procesos internos, la colaboración entre actores, y la capacidad de las organizaciones para incorporar buenas prácticas de gestión y retroalimentación.

4.2.3.3 Precisión presupuestaria

La tercera dimensión abordada en las entrevistas fue la precisión presupuestaria, entendida como la capacidad de estimar costos de forma confiable y con el menor margen de error posible frente a los costos reales. A partir de las respuestas analizadas, se identifica que este sigue siendo uno de los retos más persistentes en la práctica presupuestaria actual, tanto por factores internos como externos.

Por un lado, los participantes señalaron que los errores más comunes en la presupuestación incluyen la omisión de rubros importantes, la subestimación de costos indirectos y la falta de integración de todos los procesos involucrados en el proyecto. Esto genera brechas significativas entre el presupuesto inicial y el comportamiento financiero real del proyecto. Uno de los entrevistados indicó que “no considerar o comprender la totalidad del alcance” es una de las principales causas de imprecisión, mientras otro destacó que los cronogramas poco realistas afectan directamente la calidad de las estimaciones.

Además, la falta de tiempo para planificar adecuadamente, así como la escasa capacitación técnica en presupuestación y gestión de proyectos, fueron señaladas como causas estructurales de baja precisión. Algunos participantes también atribuyen parte del problema a la cultura organizacional, donde se prioriza la rapidez en la entrega del presupuesto más que su solidez técnica.

En cuanto a las desviaciones presupuestarias, las respuestas reflejan que es frecuente que los proyectos presenten diferencias relevantes entre lo estimado y lo ejecutado, aunque no todos los entrevistados indicaron porcentajes específicos. Uno de estos afirmó que “muchas veces el presupuesto inicial se pierde durante la ejecución”, indicando una falta de trazabilidad, lo cual afecta la retroalimentación y el aprendizaje para futuras estimaciones.

Asimismo, la escasez de mecanismos formales para validar o verificar la precisión de los presupuestos fue una constante en las entrevistas. Aunque algunos mencionan el uso de datos históricos, esta práctica no parece estar sistematizada ni ligada a procesos de revisión formal, lo cual disminuye su efectividad para mejorar la precisión con el tiempo.

En resumen, el análisis de las entrevistas revela que la precisión presupuestaria sigue dependiendo en gran medida de la experiencia individual y del contexto específico del proyecto, más que de procedimientos organizacionales sólidos. La ausencia de validación estructurada, el escaso tiempo para una planificación detallada y los errores recurrentes en la interpretación del

alcance del proyecto constituyen factores clave que limitan la exactitud en las estimaciones de costos.

4.2.4 Resultados de los estudios de caso

Esta sección presenta el análisis de una serie de estudios de caso enfocados en herramientas de presupuestación actualmente utilizadas en proyectos de construcción. El objetivo es examinar herramientas y metodologías vigentes que no necesariamente incorporan IA, pero que sí representan buenas prácticas en la estimación, control y gestión de costos.

La selección de los casos se realizó con base en su aplicabilidad práctica, diversidad metodológica y capacidad para responder a las preguntas generadoras de la Categoría B del marco metodológico. Se incluyen herramientas tradicionales como hojas de cálculo, metodologías comparativas, plataformas colaborativas y técnicas cuantitativas de análisis de incertidumbre, todas aplicadas en contextos reales en América Latina, Europa y Asia.

4.2.4.1 Selección de los casos de estudio

Los cinco casos seleccionados para esta sección fueron escogidos con base en su capacidad para responder a las preguntas generadoras de la categoría B del marco metodológico. Se buscó representar diferentes contextos geográficos (Latinoamérica, Europa y Asia), niveles de madurez tecnológica y enfoques metodológicos, con el fin de enriquecer el análisis comparativo.

Adicionalmente, se priorizó que los casos ofrecieran documentación accesible, evidencia empírica clara sobre los procesos presupuestarios utilizados, y que abordaran fases clave como la estimación preliminar, detallada y el control de costos. Esta diversidad permite observar tanto herramientas ampliamente utilizadas (como hojas de cálculo), como otras más especializadas (como simulación de Monte Carlo o plataformas colaborativas), lo que aporta una mirada integral a la práctica actual en la gestión de costos.

A continuación, se presenta el Cuadro 4.6. comparativa con los principales atributos de cada caso, seguida del desarrollo individual de cada uno.

Cuadro 4.6. Resumen de casos seleccionados.

| Nº | Caso | Herramienta | Tipo de proyecto | Fase presupuestaria | Beneficios | Limitaciones |
|----|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| 1 | (Vera Jaime, 2024) | Hojas de cálculo + APU | Infraestructura educativa | Preliminar, Detallado, Control | Accesible, dominio técnico amplio, trazabilidad | Errores manuales, falta de integración, desactualización |
| 2 | (Arboleda & Romero, 2023) | AutoCAD vs Revit (BIM) | Vivienda de interés social | Conceptual, Preliminar, Detallado | Precisión, visualización 3D, trazabilidad de cambios | Curva de aprendizaje, costos iniciales, estandarización |
| 3 | (Cantarell & Flyvbjerg, 2017) | Reference Class Forecasting | Proyectos viales | Conceptual, Preliminar | Reducción de sesgos, mejora en decisiones, realismo | Requiere base de datos amplia, análisis estadístico |
| 4 | (Bluebeam, 2023) | Bluebeam Revu | Edificación comercial e institucional | Detallado, Control | Colaboración digital, trazabilidad, control documental | Curva de aprendizaje, resistencia al cambio |
| 5 | (González-Rodríguez, 2024) | Simulación Monte Carlo | Construcción civil e infraestructura | Preliminar, Detallado, Control | Análisis de incertidumbre, planificación realista | Dependencia de datos, complejidad técnica |

Nota: Elaboración propia.

4.2.4.2 Desarrollo individual de los casos de estudio

A continuación, se describen los principales hallazgos de los casos de estudio.

Caso 1. Aplicación de herramientas tradicionales en obra civil educativa en Támezis, Colombia - (Vera Jaime, 2024)

Este caso corresponde al análisis presupuestario y de programación de una obra civil de infraestructura educativa en el municipio de Támesis, Antioquia, en Colombia. El proyecto fue gestionado utilizando herramientas tradicionales como hojas de cálculo en Excel y análisis de precios unitarios (APU), una metodología aun ampliamente utilizada en el sector construcción en contextos donde no se ha migrado hacia soluciones digitales más integradas.

La herramienta fue aplicada tanto para la elaboración del presupuesto detallado como para la programación física y financiera de la obra, cubriendo así distintas fases del proceso: preliminar, detallado y de control de costos. El estudio documenta cómo, a pesar de tratarse de una metodología manual, su correcta implementación permite desarrollar presupuestos funcionales siempre que se mantenga rigurosidad técnica en los insumos y rendimientos considerados.

Entre los beneficios identificados, destaca la accesibilidad de la herramienta, su bajo costo y el dominio generalizado entre los profesionales del área. Además, su flexibilidad permite adaptarse a distintos tipos de proyecto y condiciones locales. Sin embargo, también se identifican limitaciones importantes: el alto riesgo de errores manuales, la falta de trazabilidad automática de cambios y la desactualización frecuente de los precios de referencia en las bases utilizadas.

La estrategia que facilitó su aplicación fue principalmente la experiencia del equipo técnico en el manejo de Excel y APU, así como la personalización del formato según las necesidades del proyecto. A pesar de estas ventajas, el caso deja en evidencia la necesidad de actualizar las herramientas tradicionales, especialmente en proyectos donde el volumen de información y la velocidad de cambio hacen cada vez más necesaria la digitalización.

Desde el enfoque de esta investigación, este caso aporta una perspectiva realista sobre la práctica actual en entornos donde aún no se han adoptado tecnologías como BIM o software especializado. Su inclusión permite contrastar las ventajas y debilidades de las metodologías tradicionales frente a herramientas más automatizadas y estructuradas, y evidencia por qué la integración progresiva de tecnologías puede ser clave para mejorar la eficiencia y precisión en la gestión de costos.

Caso 2. Comparación entre metodologías CAD y BIM para presupuestación en proyectos de vivienda en Meta, Colombia - (Arboleda & Romero, 2023)

Este caso de estudio se enfoca en la comparación entre dos metodologías comúnmente utilizadas para la estimación de costos en proyectos de construcción: la tradicional basada en

AutoCAD y la metodología BIM a través del software Revit. El análisis se aplicó sobre un proyecto de vivienda de interés social ubicado en el municipio de El Dorado, Meta (Colombia), como parte de una investigación universitaria orientada a evaluar la eficiencia de ambas metodologías en términos de precisión, trazabilidad y soporte para la toma de decisiones.

En cuanto al alcance, la evaluación abarcó tres fases presupuestarias: conceptual, preliminar y detallada. El estudio midió cómo cada metodología respondía ante la necesidad de obtener cantidades precisas, establecer costos base y analizar la coherencia entre diseño y presupuesto. Mientras la metodología tradicional implicaba extraer manualmente las cantidades desde planos 2D y cargarlas en hojas de cálculo, el enfoque BIM permitía realizar esta tarea de forma automática desde el modelo tridimensional, con actualizaciones en tiempo real ante cualquier modificación.

Entre los beneficios reportados del enfoque BIM destaca la mejora en la precisión de las cantidades estimadas, la visualización tridimensional que permite detectar interferencias o elementos omitidos, y la posibilidad de simular el impacto económico de distintas decisiones de diseño. En contraste, el método basado en CAD resultó más susceptible a omisiones, especialmente en elementos repetitivos o detalles constructivos no visibilizados en 2D.

Las principales limitaciones del enfoque BIM fueron la necesidad de capacitación técnica específica, el costo inicial de implementación del software y la estandarización del modelo para que la extracción de cantidades sea confiable. Por otro lado, el método tradicional, aunque más accesible, mostró limitaciones importantes en trazabilidad, eficiencia y actualización de datos.

La adopción de BIM fue facilitada por la formación técnica de los participantes y el soporte institucional dentro de la universidad. El análisis permitió evidenciar que, si bien ambas metodologías pueden ser utilizadas para presupuestar, la ventaja competitiva de BIM radica en su capacidad para integrar información y facilitar la toma de decisiones desde etapas tempranas.

Desde la perspectiva de esta investigación, este caso es relevante porque muestra cómo la elección de herramientas no solo afecta la forma de construir un presupuesto, sino también la forma en que se gestiona, actualiza y defiende a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Además, permite analizar el potencial de transición desde métodos tradicionales hacia soluciones más integradas, algo clave para el diseño de un marco de mejora continua en la gestión de costos.

Caso 3 – Aplicación de Reference Class Forecasting en proyectos viales en Hong Kong

- (Cantarell & Flyvbjerg, 2017)

Este caso analiza la aplicación del método de *Reference Class Forecasting* (RCF) como una herramienta para mejorar la precisión en las estimaciones de costos y tiempos en proyectos viales de gran escala en Hong Kong. Esta metodología, desarrollada inicialmente por Flyvbjerg y aplicada en varios países, se basa en el análisis estadístico de datos históricos de proyectos similares para establecer rangos de referencia que permitan prever posibles desviaciones presupuestarias desde etapas tempranas.

La herramienta fue implementada por el gobierno de Hong Kong en coordinación con su Bureau de Transporte y Vivienda, y aplicada en al menos 25 proyectos viales reales. Se utilizó principalmente en las fases conceptual y preliminar, con el objetivo de proyectar con mayor realismo el presupuesto y los plazos necesarios, considerando el historial de sobrecostos y demoras en proyectos previos.

Entre los beneficios más importantes destaca la reducción del sesgo optimista, una tendencia común a subestimar costos y sobrestimar plazos, así como el fortalecimiento de la planificación financiera desde una perspectiva basada en evidencia. Además, RCF permite ajustar el presupuesto de acuerdo con el perfil de riesgo de cada proyecto, lo cual resulta útil tanto para entidades públicas como para inversores privados que requieren escenarios más confiables para la toma de decisiones.

No obstante, el estudio también identificó limitaciones relevantes: el éxito del modelo depende directamente de la calidad y cantidad de los datos históricos disponibles, y su implementación requiere conocimientos técnicos en estadística y gestión del riesgo. Adicionalmente, algunos actores pueden mostrar resistencia a aplicar márgenes de contingencia elevados por temor a afectar la aprobación política o financiera del proyecto.

Para facilitar su adopción, el gobierno de Hong Kong promovió la estandarización de datos, la colaboración con expertos internacionales y el uso institucional del modelo como complemento a los métodos tradicionales. De esta manera, el enfoque RCF no reemplaza la estimación convencional, sino que la enriquece con una perspectiva basada en el desempeño real de proyectos anteriores.

Este caso es particularmente valioso para esta investigación, ya que ofrece una visión distinta sobre la presupuestación: no centrada en herramientas de modelado o cálculo directo, sino

en la gestión de la incertidumbre a través de una estrategia comparativa robusta. Su enfoque en la toma de decisiones desde fases tempranas refuerza la importancia de construir estimaciones sólidas desde el inicio del proyecto, alineadas con la realidad de ejecución y no solo con las proyecciones teóricas.

Caso 4. Uso de Bluebeam Revu para la gestión documental y presupuestaria en proyectos europeos - (Bluebeam, 2023)

Este caso documenta la implementación del software Bluebeam Revu en distintos proyectos de edificación ejecutados por firmas europeas en países como Alemania, Noruega y el Reino Unido. Aunque esta herramienta no es un software de presupuestación en sentido estricto, su función como plataforma de colaboración digital ha demostrado tener un impacto directo en la trazabilidad, control de cambios y eficiencia de los procesos técnicos relacionados con el presupuesto.

La herramienta fue utilizada principalmente en las fases detalladas y de control de costos de los proyectos, donde la revisión de planos, coordinación técnica y documentación asociada a cambios son críticas para mantener la coherencia entre diseño, ejecución y costos reales. Bluebeam permitió a los equipos técnicos trabajar en tiempo real sobre los mismos documentos, marcar observaciones, registrar modificaciones y compartir archivos sin recurrir a flujos de aprobación en papel.

Los beneficios identificados por las empresas usuarias fueron significativos: reducción de errores derivados de versiones desactualizadas de planos, mejora en la comunicación entre áreas técnicas, disminución de retrabajos y mayor transparencia en las decisiones que afectan el presupuesto. Además, la digitalización de procesos permitió una reducción importante en el uso de papel, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad del sector.

Sin embargo, también se reportaron limitaciones, especialmente relacionadas con la curva de aprendizaje inicial, la resistencia al cambio por parte de algunos equipos y la necesidad de integrar la herramienta con otros sistemas como BIM o ERP para aprovechar su potencial completo. La adopción fue más efectiva cuando se contó con acompañamiento técnico, capacitaciones periódicas y un enfoque progresivo de implementación.

Desde el enfoque de esta investigación, este caso resulta relevante porque permite comprender cómo herramientas tecnológicas no diseñadas exclusivamente para presupuestación

pueden fortalecer significativamente la calidad del proceso presupuestario. Al garantizar trazabilidad documental, control de versiones y una comunicación más efectiva entre actores, Bluebeam Revu aporta eficiencia, claridad y reducción de errores que, en última instancia, impactan directamente en el control de costos de un proyecto.

Caso 5. Aplicación de simulación de Monte Carlo en la estimación de reservas de contingencia de costos - (González-Rodríguez, 2024)

Este caso analiza el uso de la Simulación de Monte Carlo como herramienta para estimar de forma realista las reservas de contingencia de costos en proyectos de construcción. A través del modelado probabilístico de incertidumbres aleatorias, estocásticas y epistémicas, esta metodología permite anticipar posibles desviaciones presupuestarias antes de la ejecución del proyecto, fortaleciendo así la toma de decisiones desde fases tempranas de planificación.

El estudio, de alcance internacional, se basa en aplicaciones realizadas en entornos reales en Estados Unidos y Europa, y se centra en proyectos de construcción civil e infraestructura. La herramienta se implementa utilizando software especializado (como @Risk, Oracle Primavera Risk Analysis o Crystal Ball), y se aplica principalmente en las fases preliminar, detallada y de control de costos.

Entre los beneficios destacados se encuentra la posibilidad de cuantificar la incertidumbre mediante simulaciones que generan miles de escenarios posibles. Esto permite asignar reservas de contingencia no de forma arbitraria, sino con base en distribuciones estadísticas que reflejan el riesgo real del proyecto. También fortalece la comunicación con los *stakeholders* al justificar presupuestos más robustos con evidencia numérica.

No obstante, su implementación requiere datos de entrada bien calibrados, un conocimiento técnico sólido en estadística, y una correcta interpretación de los resultados. Estas condiciones pueden dificultar su adopción en organizaciones con baja madurez en gestión de riesgos o con limitaciones en el acceso a información histórica confiable.

La adopción de esta metodología fue facilitada cuando se integró como complemento a otros procesos existentes, y no como reemplazo. También se recomendó realizar capacitaciones al equipo de costos y establecer protocolos para la recolección estructurada de datos en fases tempranas del proyecto.

Este caso es especialmente relevante para esta investigación porque demuestra cómo las herramientas actuales de presupuestación ya incorporan elementos de análisis avanzado que van más allá del cálculo estático. La simulación de Monte Carlo representa una evolución en la forma de asignar recursos presupuestarios, integrando la dimensión del riesgo como parte esencial de una planificación financiera más realista y estratégica.

4.2.4.3 Análisis transversal de los casos de estudio

El análisis comparativo de los cinco estudios de caso seleccionados para la Categoría B permite identificar cómo se están utilizando actualmente diversas herramientas y metodologías de presupuestación en proyectos de construcción. Aunque no todas las soluciones analizadas incorporan inteligencia artificial, su implementación práctica aporta información valiosa sobre los procesos, beneficios y desafíos que enfrentan las organizaciones al momento de gestionar costos.

Uno de los aspectos más notables es la diversidad de enfoques, que va desde metodologías tradicionales basadas en hojas de cálculo (Caso 1), hasta herramientas digitales especializadas como Bluebeam Revu (Caso 4), plataformas integradas BIM (Caso 2) y técnicas avanzadas de análisis probabilístico como la simulación de Monte Carlo (Caso 5). Esta variedad evidencia que no existe una única forma de presupuestar, sino que la elección de herramientas responde a factores como el tipo de proyecto, la madurez tecnológica de la organización y la fase del presupuesto en la que se interviene.

En cuanto a los procesos que cubren, se observa que todas las herramientas permiten desarrollar presupuestos detallados, pero algunas también aportan valor en la estimación conceptual (Casos 2 y 3) y en la gestión del control de costos durante la ejecución (Casos 1, 4 y 5). Esta cobertura integral refuerza la importancia de seleccionar herramientas que no solo generen cifras iniciales, sino que acompañen el ciclo completo del proyecto, permitiendo hacer ajustes informados y en tiempo real.

Los beneficios más comunes reportados por los casos incluyen: mejora en la precisión de las estimaciones, reducción de errores manuales, mejor trazabilidad de los cambios, apoyo a la toma de decisiones estratégicas y mayor transparencia ante interesados. No obstante, también se identificaron limitaciones importantes, como la necesidad de capacitación técnica (Casos 2 y 4), la dependencia de datos históricos bien estructurados (Casos 3 y 5), y la falta de integración entre herramientas en el caso de metodologías más tradicionales (Caso 1).

Desde el punto de vista de la implementación, los casos demuestran que la adopción exitosa de herramientas de presupuestación requiere más que una decisión técnica: implica una estrategia organizacional, acompañamiento en el cambio cultural y una gestión activa del conocimiento. Ya sea al implementar software especializado o al introducir metodologías comparativas como el Reference Class Forecasting, la clave está en integrar las herramientas al contexto real del proyecto y del equipo de trabajo.

Finalmente, estos casos aportan información directa para responder a las preguntas generadoras de la Categoría B. En conjunto, como se visualiza en el Cuadro 4.7., muestran cómo las herramientas actuales cubren diferentes fases del presupuesto, qué beneficios tangibles aportan, qué barreras enfrentan y qué condiciones organizacionales favorecen su implementación. Esta información será clave para el diseño del marco de referencia planteado en el siguiente capítulo, permitiendo establecer líneas base realistas desde las cuales se puede evaluar el aporte diferencial de la inteligencia artificial.

Cuadro 4.7. Resumen de factores relevantes de los casos de estudio.

| Caso | Tipo de herramienta | Fase presupuestaria | Beneficios | Limitaciones |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Támesis, Colombia | Excel + APU | Preliminar, Detallado, Control | Accesible, flexible, dominio técnico amplio | Errores manuales, falta de integración, precios desactualizados |
| Meta, Colombia | AutoCAD vs Revit (BIM) | Conceptual, Preliminar, Detallado | Precisión, trazabilidad, visualización 3D | Curva de aprendizaje, costos iniciales, estandarización |
| Hong Kong | Reference Class Forecasting | Conceptual, Preliminar | Reducción de sesgos, planificación basada en evidencia | Requiere datos históricos y análisis estadístico |
| Europa (varios) | Bluebeam Revu | Detallado, Control | Trazabilidad, colaboración digital, reducción de errores | Resistencia al cambio, integración con otros sistemas |

| Caso | Tipo de herramienta | de Fase presupuestaria | Beneficios | Limitaciones |
|---------------|---------------------------|--------------------------------|---|--|
| Global | Simulación de Monte Carlo | Preliminar, Detallado, Control | Estimación realista de reservas, gestión de incertidumbre | Complejidad de necesidad de datos confiables |

Nota: Elaboración propia.

Para completar este análisis transversal desde una perspectiva alineada con las subcategorías definidas para esta investigación, se construyó además el Cuadro 4.8. que organiza los hallazgos de los cinco casos en función de tres ejes clave: el alcance de la gestión de costos, la eficiencia presupuestaria y la precisión de las estimaciones. Esta herramienta visual refuerza la conexión metodológica entre los casos y las categorías de análisis, facilitando la triangulación con entrevistas y revisión bibliográfica que se presentaron anteriormente.

Cuadro 4.8. Síntesis de aporte de los casos de estudio por categoría.

| Subcategoría | Caso 1: Hojas de cálculo (Colombia) | Caso 2: BIM en VIS (Colombia) | Caso 3: RCF (Hong Kong) | Caso 4: Bluebeam Revu (Europa) | Caso 5: Simulación Monte Carlo (EE.UU./Alemania) |
|--|--|---|---|--|--|
| B1.1 Alcance de gestión de costos | Limitado a estimación inicial; sin integración | Integración desde fase conceptual hasta control | Enfocado a predicción inicial | Mejora la trazabilidad y revisión digital | Complementa y planificación orientado a la incertidumbre |
| B1.2 Eficiencia presupuestaria | Bajo nivel de automatización | Alta eficiencia en detección de errores | Requiere análisis complejo y datos estadísticos | Reduce reprocesos y mejora colaboración | Agiliza decisiones bajo riesgo; alto costo técnico |
| B1.3 Precisión presupuestaria | Precisión media (5–10%) | Alta precisión (<5% desviación) | Precisión variable (>10% desviación) | Precisión mejorada por validación continua | Alta precisión basada en modelos probabilísticos |

Nota: Elaboración propia

Finalmente, más allá de los aspectos técnicos evaluados en los casos, es importante destacar que la efectividad de cualquier herramienta no depende únicamente de su funcionalidad, sino también de las condiciones organizacionales que acompañan su implementación. Los casos muestran que estrategias como la adopción gradual, la capacitación técnica y la integración con procesos existentes son determinantes para el éxito de cualquier metodología presupuestaria.

Este bloque de análisis aporta una base sólida para comparar las prácticas actuales con propuestas tecnológicas emergentes como las vistas en la Categoría C, e identifica brechas concretas que pueden ser atendidas mediante la incorporación estratégica de inteligencia artificial.

4.2.5 Resultados del análisis comparativo de casos

Con el objetivo de caracterizar el estado actual de las herramientas y metodologías empleadas en la presupuestación de proyectos de construcción en Costa Rica, se aplicó la herramienta de análisis de casos incluida en el apéndice B.2. Esta ficha fue diseñada en el marco metodológico para recopilar, organizar y comparar información clave sobre plataformas utilizadas actualmente que no incorporan inteligencia artificial. Su aplicación responde directamente al segundo objetivo específico del estudio, relacionado con la caracterización de métodos actuales, y complementa los hallazgos obtenidos por entrevistas, encuestas y revisión bibliográfica.

Se seleccionaron tres herramientas representativas, con distintos niveles de digitalización, escalabilidad y aplicación según el tipo de proyecto y organización usuaria: Excel, S10 y Presto. Esta selección intencionada busca contrastar el uso de una herramienta de entrada básica, una solución estructurada de uso público y una herramienta profesional ampliamente utilizada en el sector privado. A continuación, se presenta cuadro 4.9. que compara con los principales resultados derivados de la aplicación de la herramienta:

Cuadro 4.9. Resumen comparativo de las diferentes herramientas utilizadas en los casos de estudio.

| Variable / Herramienta | Excel | S10 | Presto |
|---|--|---|---|
| Tipo de herramienta | Hoja de cálculo libre | Software especializado latinoamericano | Software profesional europeo |
| Nivel de automatización | Bajo | Medio | Medio – Alto |
| Interoperabilidad | Muy baja | Moderada (con catálogos de obra pública) | Alta (vinculación con software de control) |
| Tipo de usuario común | PYMEs, técnicos independientes | Instituciones públicas y constructoras locales | Consultoras y empresas privadas formalizadas |
| Principales ventajas | Flexibilidad, bajo costo, alta disponibilidad | Base de datos predefinida, compatibilidad con pliegos de licitación | Informes técnicos detallados, trazabilidad, control de cambios |
| Principales limitaciones | Alto riesgo de errores, no escalable, sin control de versiones | Baja flexibilidad para personalizar estructuras | Curva de aprendizaje, dependencia de licencia y soporte técnico |
| Nivel de integración con otras fases | Muy bajo | Parcial (control de obra manual) | Parcial a alto (según configuración del usuario) |
| Capacidad para actualizar precios | Nula (requiere ingreso manual) | Parcial (catálogos fijos) | Parcial (requiere actualización externa) |
| Validación automática de datos | No | Parcial | Parcial a moderada |

Nota: Elaboración propia.

El análisis de los tres casos evidencia que, aunque existen diferencias notables entre las herramientas en términos de sofisticación y estructura, todas comparten una limitada capacidad de integración sistémica. En particular, se identifica una fuerte dependencia del juicio y experiencia del profesional que las utiliza, lo que puede generar errores, subjetividades y dificultades para replicar procesos o mantener trazabilidad.

Excel, a pesar de ser ampliamente utilizado por su flexibilidad, es una herramienta propensa a errores humanos, sin control de versiones ni validación automatizada. Esto lo convierte

en una solución viable únicamente para proyectos pequeños o profesionales con experiencia muy consolidada. S10, por su parte, ofrece un entorno más estructurado, especialmente en obras públicas, gracias a su compatibilidad con pliegos y bases de datos locales. No obstante, su flexibilidad es reducida, y presenta dificultades para adaptarse a contextos innovadores o modelos personalizados de costos. Finalmente, Presto se posiciona como una solución profesional robusta, con mayores capacidades de trazabilidad y control, pero su implementación requiere mayor inversión, capacitación técnica y soporte.

Se identifican así limitaciones estructurales comunes:

- Ausencia de validación automática de datos.
- Baja interoperabilidad con otras fases del proyecto (como planificación, compras o ejecución).
- Dificultad para actualizar precios dinámicamente según el mercado.
- Falta de integración con herramientas predictivas o de visualización.

Estas limitaciones representan una oportunidad directa para explorar cómo tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, podrían contribuir a cerrar estas brechas, especialmente en tareas críticas como validación, automatización de cálculos, extracción de cantidades o análisis comparativo de precios. Esta sección servirá como base para el contraste posterior con la categoría C.

4.2.6 Análisis de la Categoría B – Gestión de costos en proyectos de construcción

La presente sección integra los hallazgos más relevantes de la Categoría B, dedicada a analizar la gestión de costos en proyectos de construcción sin el uso de inteligencia artificial. El análisis se estructuró según las tres subcategorías que se han manejado a lo largo de la sección.

4.2.6.1 Alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción

Los hallazgos obtenidos a partir de los diferentes instrumentos evidencian que el alcance actual de la gestión de costos en el sector construcción es limitado y muchas veces fragmentado. Las entrevistas reflejan que, en la mayoría de las organizaciones, la gestión de costos se concentra únicamente en la etapa de estimación inicial del proyecto, con débil integración con el control durante la ejecución. Los entrevistados señalaron que esta desconexión genera retrabajos y falta de retroalimentación para mejorar futuros presupuestos.

Las encuestas estructuradas refuerzan esta percepción: el 72% de los participantes afirmaron que no existe trazabilidad entre el presupuesto inicial y los costos reales ejecutados. Además, solo el 38% indicó que la gestión de costos cubre más allá de la etapa de licitación.

La revisión bibliográfica respalda esta debilidad estructural, destacando la necesidad de entender la gestión de costos como un proceso continuo, vinculado tanto a la planificación como al control de ejecución. Los estudios de caso ilustran con claridad esta desconexión: en los casos que emplean hojas de cálculo, la gestión de costos termina en la entrega del presupuesto. Solo herramientas más avanzadas (como BIM o Bluebeam) evidencian cierto grado de integración con la ejecución.

4.2.6.2 Eficiencia presupuestaria

Desde la perspectiva de eficiencia, las entrevistas señalaron como principales obstáculos la duplicación de esfuerzos, la ausencia de automatización y el uso de herramientas obsoletas. Uno de los informantes afirmó que "se pierden horas en tareas repetitivas que podrían resolverse con una herramienta integrada". Este punto fue también reforzado en los estudios de caso, donde las herramientas tradicionales (como Excel) requieren procesos manuales y son propensas a errores humanos.

Las encuestas aportaron datos reveladores: más del 65% de los encuestados considera que su sistema de presupuestación no es eficiente. Los estudios de caso muestran que solo las plataformas digitales con flujos colaborativos estructurados (como Presto o Bluebeam) lograron reducir procesos y acelerar la toma de decisiones.

El análisis comparativo evidencia que las herramientas con mayor grado de automatización y conexión con otras plataformas (BIM, Monte Carlo, Presto) presentan mejor rendimiento en eficiencia, siempre que exista una base organizacional para su implementación. En cambio, herramientas aisladas o artesanales tienen mayores tasas de retrabajo y desperdicio de tiempo.

El análisis de causa raíz vincula la baja eficiencia no solo a las herramientas, sino a la falta de procesos estandarizados, gobernanza de datos y capacitación continua. Esta conclusión se alinea con lo expuesto en la bibliografía especializada, donde se indica que la eficiencia depende tanto de la tecnología como de su integración a procesos institucionales.

4.2.6.3 Precisión presupuestaria

La precisión presupuestaria fue identificada como uno de los mayores retos en el sector. En las entrevistas, varios participantes reconocieron que los errores más comunes incluyen omitir rubros relevantes o subestimar costos indirectos. Uno de ellos afirmó que "la presión por entregar rápido impide hacer una revisión detallada del alcance".

Las respuestas de la encuesta confirmaron esta preocupación: solo el 26% de los encuestados consideró que los presupuestos en su organización son "muy precisos". Además, el 57% reportó desviaciones superiores al 10% entre el presupuesto inicial y los costos finales en al menos un tercio de los proyectos.

Los estudios de caso complementan esta visión: herramientas como RCF y Monte Carlo buscan mejorar la precisión, pero dependen de datos confiables y experiencia técnica. Incluso en herramientas digitales como S10, la precisión se ve comprometida cuando no hay una correcta interpretación del alcance del proyecto.

Desde la bibliografía, se señala que la precisión presupuestaria mejora cuando existe retroalimentación entre estimaciones y resultados reales, algo que pocos casos implementan de forma estructurada. Y por su parte, el análisis de causa raíz destaca que las imprecisiones no son solo técnicas, sino estructurales: falta de tiempo para revisar, carencia de datos históricos actualizados, y debilidad en los mecanismos formales de validación. Esta mirada integral permite comprender que mejorar la precisión requiere no solo herramientas más potentes, sino cambios en la cultura organizacional.

4.2.6.4 Síntesis del análisis

La síntesis de los hallazgos de la Categoría B se puede ver en el siguiente cuadro:

| Subcategoría | Hallazgos clave |
|--|---|
| Alcance de la gestión de costos | <ul style="list-style-type: none">• La gestión de costos en muchos proyectos se restringe a la fase de estimación inicial, sin extenderse adecuadamente a las etapas de control y cierre.• Existe una desconexión entre el presupuesto planteado en la licitación y el monitoreo de los costos reales en obra.• El 72% de los encuestados indicó que no se realiza un seguimiento formal entre el presupuesto inicial y los costos ejecutados.• Solo el 38% de los profesionales afirmó que el presupuesto abarca todas las fases del proyecto.• Esta desconexión limita la capacidad de ajustar decisiones en tiempo real y afecta la toma de decisiones estratégicas. |

| Subcategoría | Hallazgos clave |
|----------------------------------|---|
| Eficiencia presupuestaria | <ul style="list-style-type: none"> • Muchas organizaciones aún utilizan procesos manuales o herramientas poco integradas (como Excel), lo que genera reprocesos y lentitud. • La falta de estandarización y sistematización ocasiona errores recurrentes y retrasos en la aprobación de presupuestos. • Plataformas como Presto, S10 o Bluebeam han demostrado mejoras significativas en eficiencia cuando se implementan correctamente. • Más del 65% de los encuestados considera que el proceso actual en su organización no es eficiente. • La eficiencia mejora cuando hay colaboración entre áreas técnicas, administrativas y financieras desde etapas tempranas. |
| Precisión presupuestaria | <ul style="list-style-type: none"> • La precisión presupuestaria sigue dependiendo en gran medida de la experiencia del profesional, más que de procesos formales. • Persisten errores como la omisión de rubros, estimaciones genéricas, y falta de actualización de bases de datos de precios. • La subestimación de costos indirectos y de riesgos es una causa común de desviaciones. • La mayoría de las organizaciones no cuenta con mecanismos sistemáticos de validación presupuestaria. • Las desviaciones entre lo estimado y lo ejecutado son frecuentes, pero pocas veces se documentan como lecciones aprendidas. |

Nota: Elaboración propia.

4.3 Categoría C: Inteligencia Artificial

La Categoría C se enfocó en explorar la aplicación de Inteligencia Artificial en procesos de presupuestación dentro de proyectos de construcción, analizando su tipología, beneficios y limitaciones, así como las estrategias de implementación y las lecciones aprendidas en experiencias previas. Esta categoría es especialmente relevante para el estudio, ya que permite contrastar el estado actual del proceso presupuestario (analizado en la Categoría B) con las posibilidades que ofrece la tecnología emergente, generando insumos clave para la formulación de propuestas y recomendaciones.

Para ello, se definieron las siguientes subcategorías:

C1.1 Tipología de IA existente aplicada a presupuestación,

- C1.2 Beneficios y limitaciones de la IA en este proceso,
- C1.3 Estrategias de implementación de IA en presupuestación, y
- C1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas.

A continuación, se presentan los hallazgos organizados por subcategoría, seguidos de un análisis preliminar integrado que permitirá evaluar la aplicabilidad real de la IA frente a los desafíos observados en las categorías anteriores.

4.3.1 Resultados de la revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica desarrollada para la Categoría C se enfocó en analizar el papel de la IA en los procesos de presupuestación dentro del sector de la construcción. Las fuentes seleccionadas permitieron construir un panorama completo y actualizado, integrando tanto revisiones sistemáticas como estudios de caso prácticos. A continuación, se presentan los principales hallazgos organizados según las subcategorías definidas anteriormente.

4.3.1.1 Tipología de IA existente

La tipología de IA aplicada en la presupuestación de proyectos de construcción ha experimentado una notable evolución en los últimos años, y la literatura revisada muestra una variedad de enfoques técnicos que abarcan desde métodos más tradicionales basados en reglas lógicas hasta avanzados modelos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo. La IA aplicada a presupuestación se estructura principalmente en tres grandes categorías que responden a las necesidades y particularidades de los proyectos en las distintas fases del ciclo de vida.

1. **Modelos Predictivos de Costos:** El uso de modelos predictivos en presupuestación se ha consolidado como una de las aplicaciones más comunes de la IA en la industria de la construcción. Este tipo de IA emplea algoritmos de aprendizaje supervisado para analizar grandes volúmenes de datos históricos y generar predicciones de costos con mayor precisión que los métodos tradicionales. Los modelos predictivos son particularmente útiles en fases tempranas del proyecto, donde la información es limitada, pero se requieren estimaciones de costos para tomar decisiones rápidas.

Entre las técnicas más comunes en esta categoría se incluyen redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, árboles de decisión y técnicas de ensamble como *random forest* (Datta et al., 2024). Estos modelos de aprendizaje supervisado permiten identificar

patrones ocultos en los datos y generar estimaciones precisas incluso cuando los datos disponibles son parciales o inciertos.

Por ejemplo, el caso de Czarnecki & Lewiński (2021) en el que se comparan los modelos XGBoost, SVM y MLP muestra que XGBoost se destacó por su precisión y consistencia en la predicción de costos, con menores márgenes de error, incluso cuando los datos de entrada estaban sujetos a variabilidad.

2. **Sistemas de Extracción y Análisis de Datos:** La extracción automática de datos y el análisis semántico de documentos se ha convertido en una técnica fundamental en los procesos de presupuestación. Este tipo de IA utiliza técnicas de procesamiento de lenguaje natural y visión por computadora para interpretar documentos como planos, especificaciones técnicas y contratos, los cuales son fundamentales para obtener información precisa sobre las cantidades y características de los materiales requeridos.

Un ejemplo de este enfoque es el trabajo realizado por Choi et al. (2015), quienes utilizaron reglas semánticas aplicadas a modelos BIM para extraer de forma automática las cantidades de materiales necesarias en las fases tempranas del diseño. El uso de NLP también permite digitalizar los textos contractuales y los documentos normativos, facilitando la integración de la información en modelos de IA que alimentan el proceso de presupuestación. Este tipo de IA resulta crucial cuando los datos deben ser interpretados en diferentes formatos y estructuras, como ocurre con los planos y los contratos en las etapas iniciales de los proyectos.

3. **Modelos Híbridos y Adaptativos:** La categoría de modelos híbridos y adaptativos combina algoritmos predictivos con reglas heurísticas y técnicas simbólicas para mejorar la precisión de las estimaciones bajo condiciones de alta incertidumbre. Esta categoría integra diferentes tipos de IA con el fin de adaptar el modelo a situaciones cambiantes y complejas, como las que se enfrentan en proyectos de gran escala con altos niveles de incertidumbre.

Liu & Ma (2015) aplicaron una ontología y NLP para estructurar el conocimiento técnico de la presupuestación. Si bien no se trataba de un modelo predictivo en sí, la representación estructurada del conocimiento juega un papel fundamental en la creación de bases de datos confiables, lo que facilita la posterior aplicación de modelos predictivos. Los modelos

híbridos también incluyen algoritmos genéticos y redes neuronales profundas, que permiten entrenar modelos más robustos y adaptativos.

4.3.1.2 Beneficios y limitaciones

Uno de los hallazgos más consistentes en la literatura revisada es que la implementación de inteligencia artificial en procesos de presupuestación en la construcción puede generar beneficios significativos en términos de precisión, eficiencia y toma de decisiones informada. Según los autores como Datta et al. (2024), los algoritmos de aprendizaje automático permiten analizar grandes volúmenes de datos históricos y realizar estimaciones más precisas al reducir el error humano. Asimismo, estas tecnologías son capaces de reconocer patrones ocultos en los datos, ajustar sus modelos a condiciones cambiantes del mercado y ofrecer predicciones en tiempo real, lo que representa una ventaja competitiva sustancial frente a los métodos tradicionales.

En la misma línea, la automatización de tareas repetitivas, como la extracción de cantidades o la evaluación de presupuestos preliminares, permite a los equipos técnicos enfocar sus esfuerzos en actividades de mayor valor estratégico. También destacan que el uso de IA contribuye a reducir los tiempos de preparación de presupuestos, lo cual puede acelerar el proceso de licitación y mejorar la capacidad de respuesta ante solicitudes de clientes o cambios en el diseño (Abioye et al., 2021).

Desde el contexto latinoamericano, Mendoza et al. (2022) aportan una visión que refuerza los beneficios anteriormente descritos, pero con un enfoque más situado. En particular, reconocen que incluso la aplicación de modelos relativamente simples, como regresiones o redes neuronales básicas, ha permitido mejorar significativamente la coherencia interna de los presupuestos y facilitar el entrenamiento de personal técnico en el uso de herramientas digitales. En regiones donde la profesionalización en la gestión de costos es aún incipiente, estas herramientas pueden actuar como mecanismos de estandarización técnica.

No obstante, todas las fuentes coinciden en que estos beneficios no están exentos de obstáculos, ya que la efectividad de los modelos depende directamente de la calidad de los datos disponibles. En la mayoría de los casos, los datos históricos no están estructurados, presentan errores, o carecen del volumen necesario para entrenar modelos robustos. Este desafío se ve amplificado por la falta de interoperabilidad entre plataformas digitales, lo que dificulta integrar

los sistemas de IA con herramientas de uso común como software de modelado (BIM) o de planificación (ERP) (Datta et al., 2024).

Además, Abioye et al. (2021) identifican como una de las principales limitaciones la resistencia cultural dentro de las empresas constructoras. La adopción de IA suele enfrentarse a escepticismo por parte de los equipos, especialmente cuando existe poca familiaridad con las herramientas digitales. Además, esta resistencia también está asociada a temores sobre la pérdida de empleo o la pérdida de control técnico sobre los resultados generados por máquinas. La ausencia de políticas claras de gobernanza de datos, así como la carencia de marcos regulatorios que validen el uso de IA en procesos contractuales, agrava esta situación.

Mendoza et al. (2022) complementan esta perspectiva al señalar que, en el ámbito latinoamericano, el acceso limitado a financiamiento, la baja inversión en innovación y la falta de formación especializada dificultan la integración efectiva de estas tecnologías. En muchos casos, los modelos desarrollados se limitan a pruebas académicas o pilotos aislados, sin llegar a consolidarse como parte de los procesos estándar de presupuestación.

En síntesis, los beneficios de la IA en la presupuestación son claros: mejora de la precisión, ahorro de tiempo, mayor estandarización y apoyo en la toma de decisiones. Sin embargo, su aprovechamiento efectivo requiere superar barreras técnicas (como la calidad y disponibilidad de datos), organizacionales (como la cultura interna y la capacitación), y estructurales (como la interoperabilidad entre sistemas y la ausencia de marcos normativos). La literatura sugiere que el éxito de la implementación está condicionado tanto por la madurez tecnológica como por la capacidad institucional de gestionar el cambio.

4.3.1.3 Estrategias de implementación

El proceso de implementación de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos constructivos no solo implica la adopción de herramientas tecnológicas, sino también la transformación progresiva de estructuras, procesos y capacidades organizacionales. La revisión bibliográfica analizada permitió identificar diversas estrategias de implementación utilizadas en distintos contextos, que podrían orientar futuras iniciativas de adopción tecnológica en empresas constructoras, especialmente en entornos emergentes como el latinoamericano.

Datta et al. (2024) plantean que una de las estrategias más efectivas consiste en iniciar la adopción mediante la aplicación de algoritmos simples de aprendizaje supervisado, que puedan

integrarse con relativa facilidad a los sistemas existentes. Proponen que estos modelos se usen inicialmente como herramientas de apoyo, permitiendo validar su efectividad sin interferir con los procesos operativos en marcha. Esta estrategia escalonada evita el choque organizacional y favorece la acumulación progresiva de confianza en la herramienta.

Complementando este enfoque técnico, se desarrolla un modelo de aceptación tecnológica basado en la integración del *Technology Acceptance Model* (TAM) y el *Technology–Organization–Environment* (TOE) *framework*. Este modelo identifica factores organizacionales, tecnológicos y contextuales que deben tomarse en cuenta para una implementación exitosa. Entre los factores críticos destacan el liderazgo claro de la alta dirección, la compatibilidad tecnológica con los flujos de trabajo existentes, la infraestructura de soporte y la presión del entorno competitivo. El modelo también subraya la importancia de generar una percepción de utilidad y facilidad de uso por parte de los equipos técnicos (Na et al., 2022).

Rane (2023) ofrece una perspectiva aplicada desde la integración entre BIM e IA, destacando la necesidad de fomentar la interoperabilidad entre plataformas mediante estándares abiertos y la implementación de programas de formación continua para los usuarios. A la vez, propone como estrategia clave el desarrollo de proyectos piloto con alcance controlado, que permitan validar la tecnología en condiciones reales antes de escalar su uso a nivel organizacional. Esta fase piloto debe contemplar la retroalimentación de los usuarios finales y su involucramiento en el ajuste de los modelos.

Por su parte, una revisión sistemática de la literatura científica identifica patrones comunes en la implementación de algoritmos de machine learning para presupuestación. Entre las estrategias señaladas, destacan la necesidad de asegurar bases de datos limpias y estructuradas, realizar procesos de validación cruzada de los modelos y conformar equipos interdisciplinarios que combinen conocimientos técnicos en IA con experiencia en gestión de costos. También proponen iniciar con problemas de estimación relativamente acotados, como predicción de rendimientos unitarios o análisis de desviaciones de costo, para facilitar la curva de aprendizaje organizacional (Abed et al., 2022).

En conjunto, las fuentes consultadas coinciden en que la implementación efectiva de IA en presupuestación debe combinar una estrategia técnica progresiva con una gestión organizacional del cambio. Invertir en formación especializada, garantizar la interoperabilidad entre plataformas,

crear condiciones para la experimentación segura y contar con el respaldo institucional de la alta dirección se convierten en pilares fundamentales para el éxito del proceso.

Estas estrategias, aunque pueden variar según el tamaño, nivel de madurez digital y contexto operativo de cada empresa, ofrecen lineamientos prácticos y adaptables para introducir de forma sostenible la inteligencia artificial en los procesos presupuestarios del sector construcción.

4.3.1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas

Las buenas prácticas y las lecciones aprendidas son fundamentales para que la implementación de IA en la presupuestación de proyectos de construcción sea efectiva y sostenible. Estas prácticas no solo reflejan el éxito de la tecnología aplicada, sino que también ofrecen recomendaciones clave sobre cómo superar las barreras y mejorar la integración de la IA en los procesos presupuestarios.

De los casos analizados, surgen varias prácticas destacadas que deben ser consideradas por las empresas que deseen adoptar IA en su gestión de costos y presupuestación.

1. **Involucrar al equipo técnico desde el inicio del desarrollo de la IA:** Una práctica clave que emerge de varios casos de éxito, como el de Widjaja et al. (2023), es la importancia de involucrar al equipo técnico desde las primeras etapas del desarrollo y la implementación de los modelos de IA. Los ingenieros, arquitectos y otros profesionales técnicos deben ser participantes activos no solo en la ejecución, sino también en el diseño de los modelos de IA. Esto se debe a que los expertos técnicos poseen el conocimiento práctico necesario para asegurar que los modelos de IA sean aplicables a las realidades del proyecto y sector, y que realmente mejoren la precisión y eficiencia de las estimaciones.

El desarrollo colaborativo no solo facilita una mejor adaptación de la IA a las condiciones del proyecto, sino que también aumenta la aceptación de la tecnología dentro de los equipos de trabajo. A medida que los técnicos participan en la validación iterativa de las estimaciones generadas por IA, se genera confianza en el sistema, evitando posibles resistencias internas y promoviendo su adopción de manera gradual.

2. **Validación paralela (IA vs humano):** Otra buena práctica identificada en Widjaja et al. (2023) es la validación paralela de las estimaciones generadas por IA con los cálculos manuales realizados por los expertos humanos. Esta práctica es fundamental para garantizar que los resultados generados por IA sean confiables y estén alineados con las expectativas y criterios tradicionales de los profesionales. La comparación entre IA y humanos no solo asegura la precisión, sino que también facilita la integración de la IA en los procesos tradicionales de trabajo, mostrando que la IA no es un reemplazo del criterio humano, sino una herramienta complementaria que puede mejorar la eficiencia.

La validación continua permite a las organizaciones ajustar los modelos de IA en tiempo real, mejorando su efectividad con cada iteración. Además, esta práctica genera una mayor aceptación entre los equipos técnicos, ya que los modelos de IA no sustituyen el juicio humano, sino que lo optimizan (Aboyé et al., 2021).

3. **Fomentar una cultura organizacional de confianza tecnológica:** Una de las lecciones más importantes extraídas de los casos de Juszczak et al. (2019) y Abioye et al. (2021) es la necesidad de fomentar una cultura organizacional que promueva la confianza tecnológica. La resistencia al cambio es una de las barreras más comunes en la implementación de IA, especialmente cuando los equipos se sienten inseguros acerca de la utilidad de la tecnología o temen que los modelos de IA puedan reemplazar sus roles en el proceso de presupuestación. Para superar esta resistencia, es crucial que las empresas no solo capaciten a los equipos, sino que también promuevan una mentalidad abierta y una actitud positiva hacia la IA. Chen et al. (2024) enfatizan la importancia de involucrar a los líderes de equipo en el proceso de adopción, asegurando que haya respaldo institucional. Los líderes deben apoyar la implementación de la IA y actuar como embajadores de la tecnología, alentando a los empleados a aprovechar las ventajas que la IA puede ofrecer. Además, la gestión del cambio debe ser vista como un proceso continuo, no solo en la adopción inicial, sino también en las fases de implementación para garantizar la integración efectiva de la tecnología.
4. **Iniciar con modelos simples y escalar progresivamente:** Una buena práctica es comenzar con modelos simples de IA antes de avanzar hacia enfoques más

complejos. La implementación de IA puede resultar abrumadora si se intenta adoptar una solución avanzada de inmediato. En lugar de eso, las empresas deben empezar con soluciones modulares que aborden aspectos específicos del proceso de presupuestación, como la predicción de precios unitarios o el análisis de desviaciones (Datta et al., 2024; Rane, 2023).

El uso progresivo de IA permite que los equipos se familiaricen con las tecnologías y ajusten sus métodos a medida que adquieren experiencia. El feedback recibido durante esta fase inicial puede ser utilizado para ajustar los modelos y garantizar que cumplan con las necesidades reales del proyecto antes de escalar a soluciones más complejas.

5. **Creación de alianzas estratégicas y acceso a soporte externo:** Finalmente, una práctica recomendada es la creación de alianzas estratégicas con universidades, consultores y desarrolladores de tecnología. La colaboración con expertos externos no solo ayuda a acelerar la curva de aprendizaje, sino que también ofrece soporte adicional en la implementación y optimización de IA en presupuestación. Empresas como Bechtel han aprovechado estas alianzas para integrar de manera efectiva nuevas tecnologías sin perder el enfoque en sus necesidades operativas. Las alianzas externas también ayudan a las organizaciones a mantenerse actualizadas sobre las nuevas tendencias tecnológicas, lo que permite que la implementación de IA sea sostenible a largo plazo. De acuerdo con Mendoza et al. (2022), las colaboraciones con instituciones académicas y empresas tecnológicas pueden proporcionar herramientas innovadoras que complementen los modelos de IA ya existentes y refuercen su aplicabilidad.

4.3.2 Resultados de la encuesta estructurada

Esta sección presenta los resultados obtenidos del cuestionario estructurado, específicamente aquellos vinculados con la Categoría C: Inteligencia Artificial. El análisis se organiza con base en las subcategorías definidas en el Cuadro 4.10: tipología de IA existente, beneficios y limitaciones, estrategias de implementación y buenas prácticas/lecciones aprendidas. A partir de estas preguntas, se busca comprender el nivel de exposición, percepción y disposición

de los profesionales hacia el uso de la inteligencia artificial en la etapa de presupuestación de proyectos de construcción.

Cuadro 4.10. Relación de preguntas de encuesta con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|------------|--|--|
| P13 | ¿Ha participado en algún proyecto donde se haya implementado IA en presupuestación? | Tipología de IA existente, beneficios y limitaciones |
| P16 | ¿Qué tipo de soporte o incentivos harían más fácil la adopción de IA en presupuestación en las empresas? | Estrategias de implementación |
| P17 | ¿Qué estrategias considera necesarias para superar los desafíos de adopción de IA en presupuestación? | Estrategias de implementación, buenas prácticas, beneficios y limitaciones |
| P18 | ¿Cuál es el principal desafío para la adopción de IA en presupuestos en su empresa? | Beneficios y limitaciones |
| P15 | ¿Ha notado mejoras tangibles en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA? | Beneficios y limitaciones |
| P11 | ¿Qué estrategias utiliza actualmente su empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos? | Buenas prácticas y lecciones aprendidas |
| P14 | ¿Qué factores aumentarían su confianza en el uso de IA para presupuestación? | Buenas prácticas y lecciones aprendidas |

Nota: Elaboración propia.

4.3.2.1 Tipología de IA existente

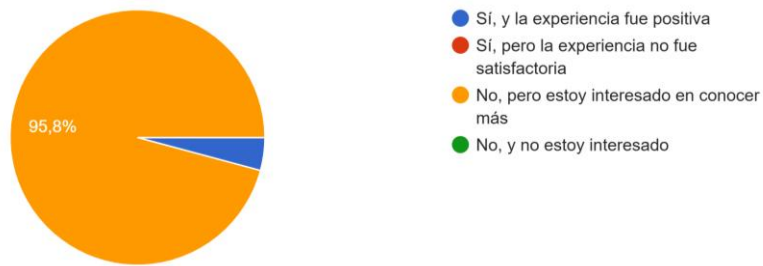
A continuación, se presentan los principales hallazgos determinados en la encuesta estructura respecto a la subcategoría de tipología de IA existente.

P13. ¿Ha participado en algún proyecto donde se haya implementado IA en presupuestación?

Esta pregunta tuvo como objetivo explorar el nivel de exposición directa que los participantes han tenido con proyectos que incorporan inteligencia artificial en la fase de presupuestación. A través de una pregunta cerrada, se buscó identificar tanto la experiencia previa como el interés por conocer más sobre esta tecnología emergente.

Tal como se observa en la Figura 4.8, el 96% de los encuestados (23 personas) indicaron que *no han participado* en este tipo de iniciativas, aunque expresaron interés en aprender al respecto. Solo una persona respondió que sí ha participado en un proyecto de presupuestación con IA, calificando la experiencia como positiva.

Figura 4.8. Cantidad de personas que han participado en algún proyecto donde se haya implementado IA en presupuestación.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

Este resultado evidencia que, pese al creciente interés en la inteligencia artificial dentro del sector de la construcción, su aplicación en presupuestación aún es incipiente entre los profesionales consultados. No obstante, el alto nivel de interés registrado podría ser una señal positiva para futuras iniciativas de formación, pilotaje o implementación.

En conclusión, el principal resultado es que la gran mayoría de los participantes no ha tenido experiencia directa con presupuestación asistida por inteligencia artificial, pero manifiesta un alto interés en aprender sobre ella, lo que sugiere un terreno favorable para futuras acciones de capacitación y proyectos piloto.

4.3.2.2 Estrategias de implementación

En cuanto respecta a las estrategias de implementación de IA en presupuestación, estos son los principales hallazgos:

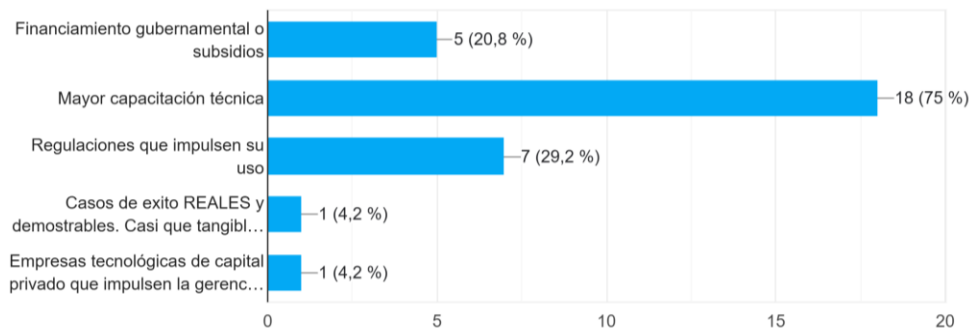
P16. ¿Qué tipo de soporte o incentivos harían más fácil la adopción de IA en presupuestación en las empresas?

Con esta pregunta se buscó identificar las condiciones que los participantes consideran más importantes para facilitar la adopción de herramientas de inteligencia artificial dentro del proceso de presupuestación. Las opciones, de tipo cerradas con selección múltiple, permitieron priorizar tanto incentivos institucionales como acciones formativas o regulatorias.

Como se observa en la Figura 4.9, la opción más señalada fue la necesidad de una mayor capacitación técnica, seleccionada por 18 de los encuestados. Este hallazgo sugiere que, incluso si

la tecnología está disponible, la adopción efectiva depende del desarrollo de competencias en los equipos involucrados. También fueron mencionadas las regulaciones que impulsen su uso (7 menciones) y el financiamiento gubernamental o subsidios (5 menciones), lo cual evidencia que las condiciones externas también juegan un papel importante en la viabilidad de implementación.

Figura 4.9. Percepción sobre los tipos de soportes o incentivos que podrían facilitar la adopción de IA en presupuestación.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

Adicionalmente, se incluyeron aportes cualitativos como:

“Casos de éxito reales y demostrables. Casi que tangibles.”
“Empresas tecnológicas de capital privado que impulsen la gerencia de proyectos desde el costeo enlazado a metodologías BIM, interoperabilidad y relación con hitos de control en obra.”

Estas respuestas refuerzan la idea de que no solo es necesario generar conocimientos técnicos, sino también construir confianza a partir de resultados comprobables y estructuras colaborativas que integren la innovación en los flujos de trabajo reales del sector.

El análisis de esta pregunta contribuye a perfilar las condiciones habilitadoras para una implementación progresiva de soluciones basadas en IA en el área de presupuestación, en línea con los intereses y necesidades identificadas por los propios profesionales del sector.

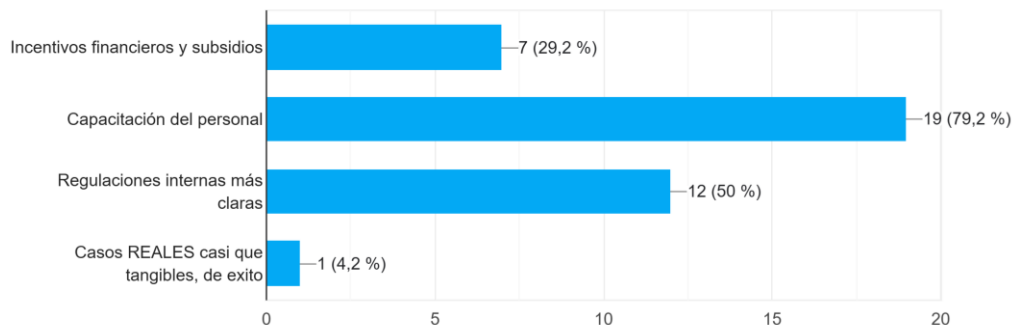
En conclusión, el principal resultado es que la capacitación técnica se percibe como la condición más decisiva para facilitar la adopción de inteligencia artificial en presupuestación, complementada por la necesidad de regulaciones claras, apoyo financiero y casos de éxito comprobables que fortalezcan la confianza en su uso.

P17. ¿Qué estrategias considera necesarias para superar los desafíos de adopción de IA en presupuestación?

Con esta pregunta se buscó identificar las acciones estratégicas que los encuestados consideran prioritarias para superar las barreras actuales en la adopción de inteligencia artificial dentro de los procesos de presupuestación. Las respuestas evidencian un fuerte consenso en torno a la preparación técnica como elemento habilitador clave.

Como se aprecia en la Figura 4.10, la opción más seleccionada fue la capacitación del personal (19 menciones), lo que refuerza el patrón observado en la pregunta anterior sobre incentivos: la formación se percibe como la estrategia más urgente y transversal para permitir el uso efectivo de la IA en la industria. Le siguen otras estrategias como el establecimiento de regulaciones internas más claras (12 menciones) y la asignación de incentivos financieros o subsidios (7 menciones).

Figura 4.10. Percepción de las principales estrategias que consideran necesarias para la adopción d IA en presupuestación.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

Una respuesta abierta agregó:

“Casos REALES casi que tangibles, de éxito.”

Esta observación subraya nuevamente la necesidad de mostrar evidencias concretas que inspiren confianza y validen la utilidad de las herramientas tecnológicas antes de su implementación masiva.

Este análisis evidencia que las estrategias más valoradas por los profesionales no solo deben centrarse en habilitadores técnicos o financieros, sino también en generar credibilidad organizacional y normativas claras que acompañen el proceso de adopción de nuevas tecnologías.

En conclusión, el principal resultado es que la capacitación del personal se considera la acción estratégica más prioritaria para superar las barreras de adopción de IA en presupuestación, complementada por la necesidad de regulaciones internas claras e incentivos financieros que respalden la implementación y fortalezcan la confianza en estas herramientas.

4.3.2.3 Beneficios y limitaciones

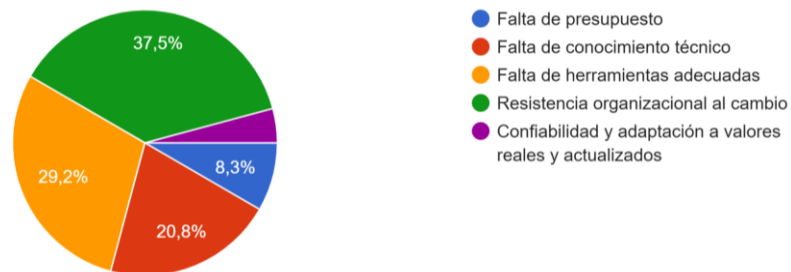
A continuación, se resumen los principales hallazgos encontrados respecto a los beneficios y limitaciones de la IA en presupuestación de proyectos de construcción.

P18. ¿Cuál es el principal desafío para la adopción de IA en presupuestación en su empresa?

Esta pregunta tuvo como finalidad identificar cuál es, según la percepción de los participantes, el principal obstáculo que limita la implementación de soluciones basadas en inteligencia artificial dentro del área de presupuestación. A diferencia de otras preguntas, esta planteó una única selección posible, lo que permitió jerarquizar los factores percibidos como más determinantes.

Tal como se observa en la Figura 4.11, la resistencia organizacional al cambio fue el desafío más señalado, con 9 menciones. Esto sugiere que, más allá de las limitaciones técnicas o presupuestarias, el cambio cultural y la disposición institucional siguen siendo una de las barreras más relevantes para la adopción de IA. Le siguen la falta de herramientas adecuadas (7 menciones) y la falta de conocimiento técnico (5 menciones), lo que reafirma la necesidad de fortalecer tanto los recursos tecnológicos como las capacidades del talento humano.

Figura 4.11. Percepción sobre los principales desafíos para la adopción de IA en presupuestación.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

También se mencionaron otras limitaciones como la falta de presupuesto (2 menciones) y la preocupación por la confiabilidad y adaptación de los modelos a valores reales y actualizados (1 mención), lo que introduce un matiz técnico interesante sobre la calidad de los resultados generados por estos sistemas.

Este análisis permite concluir que las limitaciones para adoptar IA no responden a un único factor, sino que surgen de una combinación de aspectos organizacionales, técnicos y económicos, los cuales deben ser considerados al momento de diseñar estrategias efectivas de implementación.

En resumen, el principal resultado es que la resistencia organizacional al cambio se percibe como el mayor obstáculo para implementar IA en presupuestación, seguida por la falta de herramientas y de conocimiento técnico, evidenciando que la adopción requiere tanto un cambio cultural como el fortalecimiento de capacidades y recursos tecnológicos.

Los hallazgos obtenidos mediante el cuestionario estructurado permiten dar respuesta parcial, pero significativa, a las preguntas generadoras definidas para la Categoría C. En relación con la C1.1, los resultados evidencian que, aunque el uso actual de inteligencia artificial en presupuestación es aún limitado, existe un creciente interés y familiaridad con herramientas que aplican aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural y automatización de extracción de cantidades.

Asimismo, la encuesta permite abordar la pregunta C1.2, al identificar tanto los beneficios como las limitaciones percibidas por los profesionales del sector. Se reconoce el potencial de la IA para mejorar la precisión, reducir errores y agilizar procesos, aunque también se señalan barreras como la falta de validación, resistencia al cambio y ausencia de normativa clara.

Las respuestas a las preguntas P9 y P10 contribuyen directamente a la C1.3, al señalar que la adopción de IA puede facilitarse mediante incentivos institucionales, acompañamiento técnico, capacitación especializada y evidencia práctica de casos exitosos. Por último, aunque la pregunta C1.4 no se aborda de forma directa desde la encuesta, sí se recopilan elementos que podrían alimentar un conjunto preliminar de buenas prácticas, principalmente relacionadas con la transparencia, la validación empírica y la confianza organizacional.

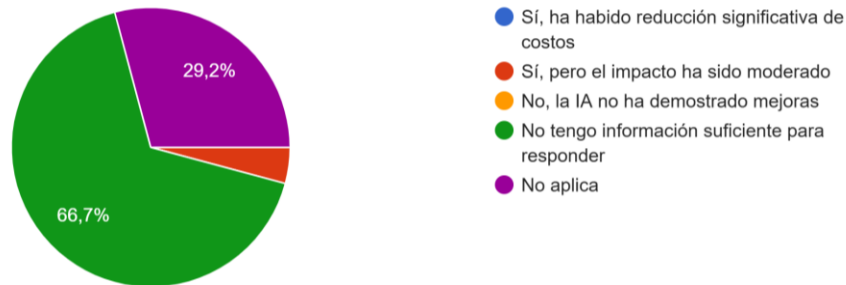
En conjunto, los resultados permiten comprender el estado actual de adopción de IA en presupuestación desde una perspectiva perceptual, ofreciendo insumos clave para construir una propuesta que sea viable, realista y contextualizada al entorno del sector construcción.

P15. ¿Ha notado mejoras tangibles en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA?

Esta pregunta pretendía explorar la percepción de los encuestados sobre el impacto real de la IA en proyectos donde ha sido implementada, en términos de optimización de recursos y eficiencia temporal.

Como se evidencia en la Figura 4.12, la mayoría de los encuestados (14 personas) manifestaron que no tienen información suficiente para emitir un juicio sobre los resultados. Esto refleja una baja exposición directa o una limitada documentación de los impactos generados por la IA en el contexto constructivo local.

Figura 4.12. Tendencia sobre si se ha notado una mejora tangible en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

Por otra parte, 6 personas indicaron haber observado mejoras moderadas en costos y tiempos, mientras que 2 participantes mencionaron reducciones significativas. Ningún encuestado indicó que la IA no haya demostrado mejoras. Estos datos muestran que, si bien aún existe una brecha de conocimiento general, quienes han tenido algún nivel de exposición tienden a reportar efectos positivos.

En conclusión, los resultados de esta pregunta confirman que la percepción sobre los beneficios tangibles de la IA todavía se encuentra en etapa emergente, lo cual refuerza la necesidad de documentar, divulgar y validar de manera más sistemática las experiencias exitosas.

4.3.2.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas

Por último, se describen los principales hallazgos encontrados respecto a las buenas prácticas y lecciones aprendidas encontradas respecto al uso de IA en presupuestación de proyectos de construcción.

P11. ¿Qué estrategias utiliza actualmente su empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos?

Esta pregunta tuvo como propósito identificar las prácticas más comunes utilizadas por las empresas para reducir el impacto de riesgos financieros en el proceso de presupuestación. Las respuestas, de tipo cerradas y con opción múltiple, reflejan la diversidad de enfoques adoptados por los encuestados en su entorno laboral.

Como se observa en la Figura 4.13, la estrategia más mencionada fue la implementación de revisiones continuas y auditorías (15 menciones), seguida por el análisis de costos históricos (14 menciones). Estas dos prácticas representan un enfoque preventivo centrado en la detección temprana de desviaciones y el aprendizaje de experiencias pasadas.

Figura 4.13. Percepción de las principales estrategias utilizadas por la empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

El uso de herramientas digitales (11 menciones) y la inclusión de reservas para contingencias (11 menciones) también fueron señaladas como estrategias relevantes, aunque con menor frecuencia. Estos hallazgos permiten observar que la eficiencia presupuestaria se busca mayoritariamente a través de mecanismos internos de control, más que por una automatización intensiva. No obstante, el uso de tecnologías aparece como una práctica en expansión.

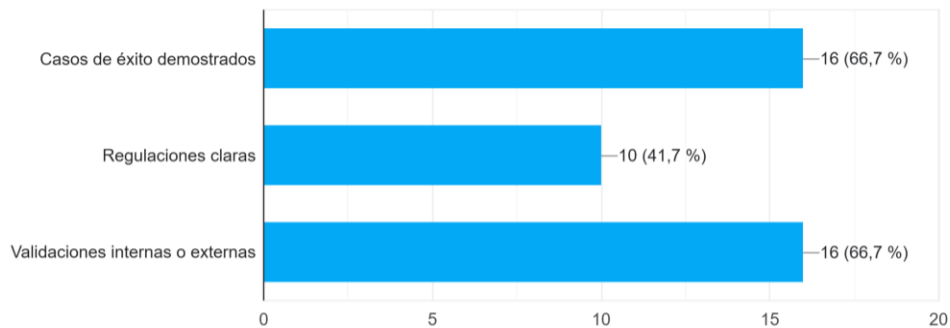
Estos resultados sugieren que muchas empresas del sector han desarrollado esquemas mixtos de mitigación, combinando prácticas tradicionales con innovaciones tecnológicas incipientes, lo cual evidencia un proceso de transición hacia enfoques más integrados en la gestión del riesgo financiero.

P14. ¿Qué factores aumentarían su confianza en el uso de IA para presupuestación?

Esta pregunta buscó identificar cuáles son los elementos clave que podrían fortalecer la confianza de los profesionales encuestados en relación con el uso de inteligencia artificial en la etapa de presupuestación. Las respuestas fueron de opción múltiple y reflejan expectativas respecto a la validación y regulación de estas herramientas.

Según lo mostrado en la Figura 4.14, el factor más relevante para aumentar la confianza fue la existencia de casos de éxito demostrados (18 menciones), lo cual sugiere que la experiencia práctica, cuando es comunicada y replicada, constituye el principal catalizador para una adopción más decidida de la IA.

Figura 4.14. Percepción sobre los principales factores que aumentarían la confianza en el uso de IA para presupuestación.



Nota: Tomado de *Google Sheets*.

Otros factores importantes fueron la validación externa mediante auditorías independientes (12 menciones), así como la existencia de regulaciones claras que respalden el uso de estas tecnologías (9 menciones). Estas respuestas ponen de relieve que, además de resultados tangibles, los profesionales valoran la existencia de marcos institucionales que respalden la fiabilidad y el uso ético de la IA.

Estos hallazgos aportan insumos valiosos para diseñar estrategias de difusión, regulación y formación que incrementen la aceptación y la implementación efectiva de tecnologías inteligentes en procesos de presupuestación dentro del sector constructivo.

4.3.3 Resultados entrevistas semiestructuradas

La presente sección expone los resultados obtenidos a partir del análisis de las entrevistas semiestructuradas realizadas en el marco de la Categoría C, la cual aborda la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en los procesos de presupuestación de proyectos de construcción.

El procesamiento de las respuestas se organizó conforme a las cuatro subcategorías definidas previamente en el diseño metodológico: tipología de IA existente, beneficios y limitaciones percibidas, estrategias de implementación propuestas, y buenas prácticas o lecciones aprendidas derivadas de experiencias previas. Esto se puede observar con mayor claridad en el Cuadro 4.11.

El objetivo de esta sistematización es identificar, a partir de las percepciones de los entrevistados, los principales elementos que caracterizan el uso actual y potencial de la IA en presupuestación, así como los factores críticos que inciden en su adopción en la industria de la construcción.

Cuadro 4.15. Relación de preguntas de entrevista con subcategorías de investigación.

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|------------|--|---|
| G2 – P1 | ¿Cuáles son las principales tendencias tecnológicas que están impactando la construcción? | Tipología de a IA |
| G2 – P2 | ¿Qué tan digitalizada considera que está la industria de la construcción actualmente? | Tipología de a IA |
| G2 – P3 | ¿Cuál es el nivel de adopción de IA en la construcción? | Tipología de a IA |
| G2 – P8 | ¿En qué fases del proceso de presupuestación cree que la IA podría tener mayor impacto? | Tipología de a IA |
| G2 – P4 | ¿Cuáles son las áreas dentro de la construcción donde la IA ha sido más efectiva? | Beneficios y limitaciones |
| G2 – P7 | ¿Cuáles son los principales beneficios del uso de IA en presupuestación? | Beneficios y limitaciones |
| G2 – P11 | ¿Cuáles son los mayores desafíos para la adopción de IA en construcción? | Beneficios y limitaciones |
| G2 – P12 | ¿Cuáles son los temores más comunes respecto a la IA en la industria? | Beneficios y limitaciones |
| G2 – P13 | ¿Considera que la regulación o normativas actuales afectan la implementación de IA en construcción? | Estrategias de implementación |
| G2 – P14 | ¿Cree que la IA puede integrarse con otros sistemas tecnológicos como BIM o ERP? | Estrategias de implementación |
| G2 – P15 | ¿Qué estrategias considera clave para fomentar la adopción de IA en presupuestación? | Estrategias de implementación |
| G2 – P17 | ¿Qué cambios en la educación y capacitación se requieren para aumentar el uso de IA en construcción? | Estrategias de implementación |
| G2 – P6 | ¿Conoce casos de implementación de IA en presupuestación? | Buenas prácticas y lecciones aprendidas |
| G2 – P18 | ¿Cree que la IA se convertirá en un estándar en presupuestación en los próximos 10 años? | Buenas prácticas y lecciones aprendidas |

| Pregunta # | Texto de pregunta | Relación con Subcategoría |
|-----------------|---|---|
| G2 – P19 | ¿Algún otro comentario o reflexión sobre la IA en construcción? | Buenas prácticas y lecciones aprendidas |

Nota: Elaboración propia.

4.3.3.1 Tipología de IA existente

En cuanto a la tipología de Inteligencia Artificial presente en procesos de presupuestación de proyectos de construcción, los entrevistados indicaron que, si bien su adopción aún es incipiente en el contexto latinoamericano y específicamente en Costa Rica, existen aplicaciones relevantes en uso o en exploración temprana.

Entre las herramientas y tecnologías mencionadas, se destacó el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la predicción de costos basados en históricos de proyectos anteriores. Algunos entrevistados señalaron el interés emergente en utilizar técnicas de procesamiento de lenguaje natural para interpretar especificaciones técnicas de proyectos y generar análisis preliminares de cantidades y materiales. Asimismo, se mencionaron soluciones de visión por computadora orientadas a la automatización de la cuantificación de obra a partir de modelos digitales y planos escaneados.

Adicionalmente, se identificaron casos donde se está comenzando a integrar la Inteligencia Artificial en plataformas de gestión de proyectos más amplias, como módulos dentro de sistemas BIM o ERP, lo que permite mejorar la trazabilidad de los datos de presupuesto a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

En general, los entrevistados coincidieron en que, aunque el uso de IA aún no es una práctica generalizada en presupuestación de proyectos de construcción, las tecnologías disponibles ofrecen un potencial significativo para transformar las etapas de análisis de costos, estimaciones preliminares y control presupuestario.

4.3.3.2 Beneficios y limitaciones

Respecto a los beneficios y limitaciones del uso de Inteligencia Artificial en presupuestación de proyectos de construcción, los entrevistados señalaron diversos aspectos que permiten entender tanto las ventajas como los retos asociados a su adopción.

Dentro de los principales beneficios mencionados se encuentran la reducción de errores humanos durante la elaboración de presupuestos, así como la agilización de los procesos de estimación y la posibilidad de lograr una mayor precisión en la proyección de costos. Algunos

entrevistados destacaron que la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos históricos permite identificar patrones de costos más consistentes, lo cual fortalece la toma de decisiones en etapas tempranas de los proyectos.

Por otro lado, las principales limitaciones percibidas incluyen la disponibilidad insuficiente de bases de datos de calidad para entrenar los modelos de IA, lo que puede afectar la fiabilidad de los resultados. También se señaló que los costos iniciales de implementación de estas tecnologías pueden ser elevados, representando una barrera para empresas medianas y pequeñas. Además, se evidenció una resistencia cultural dentro del sector, asociada a la desconfianza hacia los resultados automáticos y a la preferencia por métodos tradicionales de presupuestación.

En conjunto, las respuestas reflejan que, aunque existen beneficios tangibles en la adopción de IA en presupuestación, su implementación enfrenta todavía importantes desafíos que deben ser gestionados de forma estratégica para maximizar su impacto positivo.

4.3.3.3 Estrategias de implementación

En relación con las estrategias que podrían facilitar la implementación de Inteligencia Artificial en los procesos de presupuestación, los entrevistados propusieron varias acciones clave que consideran necesarias para favorecer una adopción progresiva y exitosa dentro del sector de la construcción.

Una estrategia recurrentemente mencionada fue la necesidad de desarrollar programas de capacitación específicos para el personal técnico y gerencial, enfocados no solo en el uso de herramientas de IA, sino también en la comprensión de sus alcances, limitaciones y formas de integración en los procesos actuales. Se destacó que la formación continua es esencial para reducir la resistencia cultural y fortalecer la confianza en los sistemas automatizados.

Asimismo, varios entrevistados recomendaron la implementación gradual de soluciones de IA, combinando inicialmente métodos tradicionales de presupuestación con tecnologías emergentes. Este enfoque permitiría realizar transiciones más controladas, validar progresivamente los resultados obtenidos y minimizar los riesgos de interrupciones operativas.

Otra estrategia sugerida fue la generación de bases de datos internas estructuradas y estandarizadas, que puedan alimentar los modelos de IA de manera más eficiente. Para ello, se subrayó la importancia de mejorar los procesos de captura, almacenamiento y organización de datos históricos de proyectos.

Finalmente, se mencionó la necesidad de establecer políticas organizacionales que fomenten la innovación tecnológica, respaldadas por la alta dirección, para crear entornos propicios para el cambio y facilitar la inversión en nuevas herramientas.

En conjunto, estas estrategias reflejan una visión práctica y adaptativa para integrar progresivamente la Inteligencia Artificial en la presupuestación, reconociendo las condiciones específicas del sector y su ritmo de adopción tecnológica.

4.3.3.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas

Respecto a las buenas prácticas y lecciones aprendidas relacionadas con la implementación de Inteligencia Artificial en procesos de presupuestación, los entrevistados compartieron diversas experiencias y recomendaciones derivadas de iniciativas en el sector.

Una de las buenas prácticas señaladas fue la integración de soluciones de IA con otras plataformas tecnológicas existentes, como sistemas BIM y ERP. Esta combinación permite aprovechar sinergias entre distintas fuentes de datos, mejorar la trazabilidad de la información y optimizar la coordinación de los procesos de planificación, costos y ejecución.

Otra práctica destacada fue la validación cruzada de los resultados generados por los sistemas de IA mediante la revisión de expertos humanos antes de su aplicación final. Los entrevistados coincidieron en que, especialmente en las etapas iniciales de adopción, es fundamental mantener controles de calidad manuales que permitan detectar posibles errores, generar confianza en la tecnología y fortalecer la toma de decisiones basada en IA.

Asimismo, algunos entrevistados compartieron la experiencia positiva de iniciar con proyectos piloto a pequeña escala, lo que permitió evaluar el desempeño de las herramientas de IA en un entorno controlado, realizar ajustes progresivos y minimizar los riesgos asociados a una implementación masiva sin etapas de prueba.

Finalmente, se destacó como lección aprendida la importancia de involucrar a los distintos actores del proyecto desde las etapas tempranas de implementación tecnológica, fomentando una cultura de colaboración, aprendizaje y apertura al cambio.

Estas buenas prácticas y lecciones aprendidas representan recomendaciones clave para maximizar el valor de la Inteligencia Artificial en presupuestación, promoviendo una adopción más segura, estratégica y efectiva.

4.3.4 Resultados de los casos de estudio

Este capítulo presenta el análisis de una serie de estudios de caso seleccionados con el objetivo de profundizar en las aplicaciones prácticas de la inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. A continuación, se presenta, en primer lugar, una síntesis comparativa de los casos analizados; posteriormente, se desarrolla una descripción individual de cada uno, seguida de un análisis transversal que permite identificar patrones, lecciones aprendidas y contribuciones al marco de referencia propuesto en capítulos posteriores.

4.3.4.1 Selección y presentación de los casos de estudio

A continuación, en el Cuadro 4.12., se presenta una síntesis comparativa de los ocho casos seleccionados. Esta tabla permite observar de forma estructurada el tipo de inteligencia artificial empleada, el tipo de prueba realizada, el enfoque técnico del estudio, los resultados obtenidos y el nivel de validación reportado por los autores.

Cuadro 4.11. Resumen de los casos seleccionados.

| Nº | Documento | Tipo de IA | Aplicación | Tipo de prueba | Resultados | Nivel de validación |
|----|------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------|
| 1 | (Widjaja et al., 2023) | Algoritmo simbólico basado en reglas | Cuantificación automatizada de acero en vigas | Implementación técnica real | Reducción de errores y tiempo de estimación | Alto |
| 2 | (Juszczak et al., 2019) | Redes neuronales (ensemble) | Predicción de costos en campos deportivos | Modelo validado con datos reales | Alta precisión y reducción de errores | Alto |
| 3 | (Czarnecki & Lewiński, 2021) | MLP, SVM, XGBoost | Comparación de modelos para costos conceptuales | Simulación con base de datos empírica | XGBoost con mejor desempeño | Alto |

| Nº | Documento | Tipo de IA | Aplicación | Tipo de prueba | Resultados | Nivel de validación |
|-----------|-------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|----------------------------|
| 4 | (Choi et al., 2015) | Automatización semántica en BIM | QTO automático en fase esquemática | Modelo aplicado con BIM real | Reducción de tiempo y errores manuales | Medio |
| 5 | (Liu & Ma, 2015) | NLP y aprendizaje de ontologías | Estandarización de reglas de estimación | Prototipo computacional | Formalización flexible de estándares | Medio |
| 6 | (Q. Chen & Sheng, 2022) | Red neuronal artificial + BIM | Gestión de costos y recursos en proyecto de estadio | Implementación en entorno real simulado | Incremento del 20% en eficiencia del proyecto | medio |
| 7 | (Castro Miranda et al., 2022) | Machine Learning (ML) | Estimación de costos en etapas tempranas de proyectos pequeños | Revisión sistemática de 46 estudios | Mejora en precisión de estimaciones (reducción del error hasta 7.6%) | Alto |
| 8 | (Saparamadu, 2025) | IA predictiva (tipo no especificado) | Estimación de costos en infraestructura de gran escala | Aplicación práctica (documentada en artículo de experiencia) | Reducción de errores y mayor eficiencia en asignación de recursos | Bajo |

Nota: Elaboración propia.

Esta diversidad metodológica y temática permite abordar distintos ángulos del fenómeno de estudio: desde modelos predictivos con aprendizaje automático hasta sistemas automatizados de cuantificación de cantidades, pasando por marcos semánticos para la estandarización de datos. En las siguientes secciones se desarrolla el análisis individual de cada uno de estos casos.

4.3.4.2 Desarrollo individual de los casos de estudio

En la presente sección, se detallarán los principales alcances encontrados en los casos de estudio.

Caso 1. Cuantificación automatizada de acero en vigas mediante IA simbólica - (Widjaja et al., 2023)

Este caso presenta el desarrollo de un algoritmo simbólico que permite estimar de forma automatizada la cantidad de acero de refuerzo en vigas de concreto. Su finalidad principal es reducir los errores que comúnmente se presentan en los procesos manuales de cuantificación y disminuir el tiempo que demanda esta tarea, especialmente en estructuras con geometrías estándar. Este tipo de soluciones se enmarcan en lo que se conoce como inteligencia artificial simbólica, ya que su funcionamiento se basa en reglas lógicas predefinidas y parámetros geométricos.

El experimento fue desarrollado por investigadores de la Universidad Kyung Hee, en Corea del Sur, y fue probado mediante simulaciones aplicadas sobre modelos estructurales representativos. Los autores validaron el modelo utilizando parámetros reales de diseño estructural, lo que permitió comparar su rendimiento con métodos tradicionales, como hojas de cálculo manuales y herramientas convencionales de modelado asistido.

Los resultados obtenidos reflejan una reducción significativa en el tiempo necesario para realizar la estimación, así como una disminución en los errores humanos durante el proceso. Aunque el sistema demostró ser eficaz con elementos estructurales típicos, se menciona que su aplicación a formas más complejas podría requerir ajustes adicionales en el algoritmo.

Desde el enfoque de esta investigación, este caso resulta relevante porque evidencia una de las formas más concretas y prácticas de aplicar IA en procesos técnicos de la presupuestación. Además, al enfocarse en un proceso tan específico como el cálculo de cantidades permite visualizar cómo la IA puede integrarse de forma directa en fases iniciales del presupuesto, facilitando la obtención de datos más precisos desde etapas tempranas del proyecto. Finalmente, este tipo de iniciativas podría complementar herramientas BIM, fortaleciendo la interoperabilidad entre modelos 3D y bases de datos de costos en tiempo real.

Caso 2. Predicción de costos en campos deportivos mediante redes neuronales combinadas - (Juszczak et al., 2019)

Este caso corresponde a una investigación enfocada en la estimación conceptual de costos de construcción en proyectos de campos deportivos, utilizando para ello un conjunto de redes neuronales artificiales organizadas en modelos combinados. El propósito del estudio fue identificar si esta técnica podía superar en precisión a los modelos tradicionales de estimación temprana, especialmente en contextos con información limitada al inicio del proyecto.

La prueba se desarrolló en la Universidad Tecnológica de Cracovia, en Polonia, y se apoyó en una base de datos de proyectos reales previamente ejecutados. Los investigadores entrenaron y compararon distintas configuraciones de modelos de redes neuronales, tanto de forma individual como agrupadas, con el fin de evaluar cuál ofrecía mejores resultados en términos de precisión, estabilidad y confiabilidad.

Entre los hallazgos más relevantes destaca que los modelos combinados superaron consistentemente a las redes individuales, reduciendo el margen de error en la predicción de costos durante la etapa conceptual del proyecto. Este tipo de resultados es especialmente valioso en contextos donde los datos disponibles son limitados, pero se requiere generar estimaciones confiables para la toma de decisiones iniciales.

Desde la perspectiva de esta investigación, el caso demuestra cómo la inteligencia artificial, específicamente las redes neuronales, puede ser aplicada con éxito para fortalecer la presupuestación en fases tempranas del ciclo de vida del proyecto. Además, evidencia que los modelos tipo ensemble no solo mejoran la precisión, sino que aportan mayor estabilidad frente a la variabilidad de los datos de entrada. Esta combinación de ventajas convierte a este enfoque en una herramienta viable para su integración futura en plataformas de estimación automatizada dentro del sector construcción.

Caso 3. Comparación de modelos de IA para estimación conceptual de costos - (Czarnecki & Lewiński, 2021)

Este estudio se enfocó en evaluar comparativamente el desempeño de distintas técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la predicción de costos en la etapa conceptual de proyectos de edificación. En particular, los autores analizaron tres tipos de modelos: redes neuronales multicapa

(MLP), máquinas de soporte vectorial (SVM) y árboles de decisión potenciados mediante gradiente (XGBoost). El objetivo fue determinar cuál de estas técnicas ofrecía mejores resultados en términos de precisión y estabilidad para ser aplicada en fases iniciales de presupuestación.

La investigación fue desarrollada en la Universidad Tecnológica de Cracovia, utilizando un conjunto de datos reales de proyectos de construcción ejecutados en Polonia. Cada uno de los modelos fue entrenado bajo las mismas condiciones, y luego se compararon sus predicciones frente a los valores reales de costos conocidos. Este enfoque permitió validar no solo el comportamiento individual de cada algoritmo, sino también su aplicabilidad en situaciones de la vida real.

Los resultados mostraron que el modelo XGBoost presentó el mejor desempeño, con menores márgenes de error y mayor consistencia en las estimaciones, incluso en presencia de datos con cierta dispersión. Estos hallazgos refuerzan la importancia de seleccionar adecuadamente el modelo de IA según el tipo de proyecto, la calidad de los datos disponibles y el nivel de precisión esperado.

Desde el enfoque de esta tesis, este caso aporta elementos clave para la toma de decisiones en la etapa conceptual, donde la incertidumbre es alta y los márgenes de error pueden tener un impacto significativo en la viabilidad financiera del proyecto. Además, brinda información comparativa sobre modelos de aprendizaje supervisado que pueden formar parte de una estrategia de adopción progresiva de IA en procesos de presupuestación, particularmente en entornos que ya cuentan con bases de datos históricas suficientemente estructuradas.

Caso 4. Automatización del cálculo de cantidades con enfoque Open BIM - (Choi et al., 2015)

Este caso se centra en el desarrollo de un sistema de extracción automatizada de cantidades (*Quantity Take-Off*, QTO) basado en modelos BIM abiertos, específicamente orientado a la estimación esquemática de estructuras de edificios durante las etapas tempranas del diseño. El objetivo principal del estudio fue reducir la carga operativa asociada a la medición manual, mejorar la trazabilidad de los datos y aumentar la precisión en las decisiones iniciales relacionadas con el presupuesto.

El sistema fue desarrollado y probado en Corea del Sur por un equipo de investigadores de la Universidad Kyung Hee, en colaboración con firmas de diseño arquitectónico. Se aplicaron modelos IFC (*Industry Foundation Classes*) y reglas de extracción semántica para interpretar la

información geométrica contenida en el modelo BIM y transformarla en cantidades asociadas a elementos estructurales como columnas, vigas y losas. Aunque no se trata de una IA en sentido estricto, el enfoque automatizado basado en reglas lógicas forma parte de los procesos de digitalización avanzada que pueden preceder a la incorporación de inteligencia artificial.

Durante su validación, el sistema logró reducir significativamente el tiempo necesario para obtener cantidades en comparación con procesos manuales o semi-automatizados, y demostró una mayor consistencia en la información generada. Si bien su efectividad depende del nivel de desarrollo (LoD) del modelo BIM y de la estandarización de los objetos modelados, el enfoque es replicable y puede escalarse a otras fases del proyecto.

Este caso es particularmente valioso porque aporta una visión clara de cómo las herramientas digitales pueden estructurar la información desde etapas muy tempranas del diseño, sentando las bases para la posterior aplicación de modelos predictivos o sistemas inteligentes. Además, subraya la importancia de la interoperabilidad entre plataformas y la necesidad de estructurar correctamente los datos para permitir análisis más avanzados en fases posteriores del ciclo de vida del proyecto.

Caso 5. Representación formalizada de estándares de estimación mediante ontologías - (Liu & Ma, 2015)

Este caso aborda una perspectiva diferente de la aplicación de inteligencia artificial en la presupuestación, enfocándose en la representación estructurada del conocimiento. El estudio propone una metodología para formalizar los estándares y reglas de estimación de costos en construcción mediante el uso de aprendizaje de ontologías y procesamiento de lenguaje natural. Su objetivo es facilitar la integración de este conocimiento técnico en sistemas computacionales, permitiendo su interpretación automática y reduciendo ambigüedades.

La investigación fue desarrollada en la Universidad de Tsinghua, en China, y se presentó en el marco de la conferencia *Creative Construction Conference*. A través de un enfoque semi-automático, los autores diseñaron un prototipo que permite extraer términos clave y relaciones lógicas desde documentos normativos, transformándolos en una ontología computable que puede ser utilizada como base para sistemas inteligentes.

Aunque este caso no está orientado directamente a la predicción de costos, su relevancia radica en que aporta un componente fundamental para el desarrollo de modelos de IA confiables:

una estructura semántica bien definida. Sin una base estandarizada de conceptos, unidades, clasificaciones y relaciones, la automatización en la presupuestación pierde consistencia y trazabilidad.

Desde el punto de vista de esta investigación, el aporte de este caso está en mostrar que la adopción efectiva de la inteligencia artificial en la estimación de costos requiere más que algoritmos predictivos. También se necesita una infraestructura de datos comprensible para las máquinas, interoperable y alineada con los estándares del sector. En este sentido, el uso de ontologías ofrece una solución viable para representar el conocimiento técnico de forma estructurada, facilitando su integración en entornos digitales que aspiran a evolucionar hacia modelos inteligentes de presupuestación.

Caso 6. Aplicación de redes neuronales en la gestión de costos mediante BIM en estadios - (Q. Chen & Sheng, 2022)

Este caso documenta la implementación de un modelo de aprendizaje automático basado en redes neuronales artificiales, específicamente diseñado para mejorar la gestión de información en proyectos de estadios mediante sistemas BIM. Su propósito central fue optimizar los procesos relacionados con la planificación, control de costos y coordinación técnica, integrando grandes volúmenes de datos constructivos de manera más eficiente que con los métodos convencionales.

El estudio fue desarrollado por investigadores de la Academia de Bellas Artes de Guangzhou, quienes propusieron una arquitectura computacional que se apoya en la capacidad de aprendizaje de los algoritmos para interpretar patrones dentro del modelo de información del edificio. A través de esta integración, el sistema fue capaz de analizar múltiples variables técnicas del estadio, como dimensiones, materiales, tiempos y recursos, permitiendo realizar proyecciones más precisas en relación con costos y cronogramas.

La validación del modelo se llevó a cabo en un entorno simulado, utilizando parámetros reales de un proyecto de estadio en China. Los investigadores compararon el rendimiento del sistema con los métodos tradicionales de gestión de costos, observando un incremento del 20% en la eficiencia general del proyecto. Este aumento se atribuyó principalmente a la reducción en tiempos de procesamiento y a la capacidad del sistema para detectar inconsistencias y redundancias en las etapas de diseño y planificación.

Desde la perspectiva de esta investigación, este caso adquiere valor al evidenciar cómo la combinación de inteligencia artificial con BIM no solo facilita la automatización de tareas complejas, sino que también amplía las capacidades analíticas de los equipos de proyecto. En contextos como la construcción de estadios, caracterizados por su alto nivel de complejidad técnica y su exigente coordinación multidisciplinaria, estas soluciones tecnológicas permiten tomar decisiones más informadas desde las etapas tempranas, lo que puede traducirse en ahorros sustanciales y mayor control presupuestario. Además, este ejemplo demuestra que incluso en entornos simulados, es posible alcanzar validaciones con resultados cuantificables, abriendo paso a futuras implementaciones en obras reales de gran escala.

Caso 7. Análisis predictivo para la estimación de costos en etapas tempranas - (Castro Miranda et al., 2022)

Este caso se enfoca en la aplicación de análisis predictivo, basado en técnicas de inteligencia artificial, para mejorar la precisión en la estimación de costos durante las etapas iniciales de proyectos constructivos. Su principal objetivo fue evaluar cómo los modelos de aprendizaje automático pueden anticipar rangos de inversión más ajustados, incluso cuando la información disponible aún es limitada, como suele ocurrir en fases de diseño conceptual.

La investigación fue llevada a cabo por un equipo multidisciplinario de académicos de universidades en España, Nueva Zelanda y Nigeria, quienes realizaron una revisión sistemática de literatura científica reciente. En total, se analizaron 46 estudios que aplicaban técnicas como redes neuronales artificiales, regresión lineal, árboles de decisión y algoritmos híbridos, todos orientados a la predicción temprana de costos en proyectos de pequeña y mediana escala, incluyendo edificios residenciales, oficinas y centros educativos.

Uno de los principales hallazgos del estudio fue que los modelos predictivos presentaron un margen de error considerablemente menor en comparación con los métodos tradicionales. En particular, se identificaron casos en los que el error medio absoluto se redujo a menos del 8%, frente a desviaciones de hasta un 25% típicas de enfoques convencionales basados en ratios o porcentajes históricos. Además, varios estudios resaltaron que la integración de estos modelos desde las primeras fases permitía una mejor planificación financiera, una identificación más clara de riesgos y una mayor eficiencia en la toma de decisiones estratégicas.

Este caso es relevante para la presente investigación porque muestra cómo la IA puede ser un recurso valioso incluso cuando la cantidad de información disponible aún es escasa. En contextos de alta incertidumbre presupuestaria, disponer de herramientas que mejoren la precisión sin requerir datos excesivos representa una ventaja competitiva. Asimismo, refuerza la idea de que la IA no necesariamente sustituye al criterio profesional, sino que actúa como complemento en el proceso de toma de decisiones, potenciando las capacidades analíticas de los equipos técnicos. Al tratarse de una revisión sistemática con múltiples fuentes, el estudio ofrece un respaldo metodológico sólido, lo que le otorga un alto nivel de validez dentro del campo académico.

Caso 8. Estimación de costos mediante IA en proyectos de infraestructura -
(Saparamadu, 2025)

Este caso presenta la experiencia documentada por un profesional del sector de la construcción en relación con el uso de herramientas de inteligencia artificial para estimar costos en proyectos de infraestructura a gran escala. El objetivo principal fue demostrar cómo la integración de modelos predictivos puede transformar procesos presupuestarios tradicionales, mejorando tanto la precisión como la eficiencia operativa desde etapas tempranas.

La implementación se llevó a cabo en un entorno profesional real, donde se aplicó una solución de IA que combinaba datos históricos de proyectos anteriores con información operativa actualizada. Aunque el tipo específico de modelo no fue detallado, el autor señala que el sistema fue capaz de aprender patrones de costos pasados para proyectar valores actualizados en nuevos proyectos. Además, se menciona que la herramienta permitía ajustes en tiempo real, considerando variables del mercado como fluctuaciones en precios de materiales y disponibilidad de mano de obra.

Uno de los beneficios más destacados fue la capacidad del sistema para reducir errores humanos en la estimación inicial, agilizando también el tiempo necesario para preparar propuestas presupuestarias. Según el testimonio, esta solución facilitó una mejor asignación de recursos y permitió prever desviaciones antes de que afectaran la ejecución del proyecto. Si bien la fuente corresponde a una publicación de LinkedIn y no a un artículo académico formal, el relato se basa en la aplicación directa de IA en un entorno constructivo, lo que le otorga valor práctico desde una perspectiva profesional.

Este caso resulta especialmente útil para esta investigación porque ofrece una mirada desde la práctica empresarial sobre el uso real de tecnologías emergentes en contextos complejos. A diferencia de otros estudios que se enfocan en entornos simulados o pruebas de laboratorio, aquí se observa una experiencia concreta, con resultados tangibles y aplicables. Aunque el nivel de validación es más bajo desde el punto de vista científico, este tipo de evidencia puede complementar los hallazgos académicos al ilustrar cómo la industria comienza a incorporar estas herramientas en su operativa diaria. Asimismo, refuerza la necesidad de documentar experiencias reales que puedan servir de base para futuros desarrollos técnicos más estructurados.

4.3.4.3 Análisis transversal de los casos de estudio

El análisis transversal que se presenta a continuación se estructura con base en las preguntas generadoras asociadas a la Categoría C del marco metodológico (Inteligencia Artificial). Específicamente, se busca identificar el tipo de IA utilizada en cada caso, la etapa del proyecto en la que se aplica, los beneficios y limitaciones reportadas, y las condiciones necesarias para su implementación en procesos de presupuestación. Esta estructura permite responder directamente al propósito de esta categoría, conectando los hallazgos de los estudios con los objetivos generales de la investigación.

El análisis comparativo de los cinco estudios seleccionados permite identificar una serie de patrones relevantes sobre la implementación de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Si bien cada caso aborda el problema desde una perspectiva distinta —ya sea mediante modelos predictivos, automatización de cantidades o estructuración semántica— todos aportan elementos clave que ayudan a visualizar el potencial y las condiciones necesarias para una adopción efectiva de IA en este ámbito.

Uno de los primeros elementos a destacar es la diversidad de técnicas utilizadas. Se identifican enfoques basados en aprendizaje automático (como XGBoost, SVM o redes neuronales), así como soluciones simbólicas y estructuradas (como el caso de las ontologías o los algoritmos por reglas). Esta diversidad sugiere que la IA aplicada a la presupuestación no depende exclusivamente de modelos predictivos avanzados, sino que puede también desarrollarse a partir de automatizaciones más sencillas, siempre que estén alineadas con la lógica del proceso de estimación.

En cuanto al tipo de prueba realizado, se observa un equilibrio entre estudios validados con datos reales (casos 2 y 3) y pruebas de laboratorio aplicadas a prototipos o simulaciones técnicas (casos 1, 4 y 5). Esta combinación refuerza la idea de que existe una base técnica suficientemente desarrollada, aunque la adopción a gran escala todavía enfrenta desafíos vinculados a la estandarización, interoperabilidad y cultura organizacional.

Respecto a los beneficios reportados, todos los casos coinciden en señalar mejoras significativas en la precisión, la reducción de errores humanos y el ahorro de tiempo en la elaboración de estimaciones. En particular, los modelos predictivos muestran una alta utilidad en fases tempranas del proyecto, donde las decisiones de costo deben tomarse con información parcial. Por otro lado, los sistemas automatizados de extracción de cantidades o de estructuración semántica aportan valor en la consolidación de datos y en la preparación del entorno digital necesario para aplicar IA de forma efectiva.

También es importante señalar las limitaciones identificadas. Varios estudios mencionan la necesidad de contar con bases de datos bien estructuradas, procesos de modelado estandarizados (especialmente en BIM), y perfiles técnicos capacitados para gestionar, interpretar y validar los resultados generados por IA. Además, algunos modelos, como el desarrollado para cuantificar acero en vigas, requieren ajustes para adaptarse a geometrías o contextos constructivos más complejos.

Finalmente, todos los casos analizados permiten extraer lecciones aplicables al diseño de un marco de referencia para la integración de IA en presupuestación. En conjunto, evidencian que la implementación efectiva de estas herramientas requiere una combinación de tecnología, metodología y contexto organizacional. No se trata únicamente de aplicar un algoritmo, sino de preparar el entorno técnico y humano para interpretar y aprovechar sus resultados dentro del proceso de toma de decisiones en gestión de costos.

En el Cuadro 4.13 se ilustra de forma visual la cantidad de beneficios y limitaciones identificadas en cada uno de los casos analizados, lo cual refuerza el análisis cualitativo con un resumen cuantitativo del impacto percibido de la implementación de IA en los procesos de presupuestación.

Cuadro 4.12. Resumen de factores relevantes de los casos de estudios.

| Caso | Tipo de IA | Etapa del proyecto | Beneficios destacados | Limitaciones |
|--------------------------------------|--|---|---|--|
| Widjaja & Kim (2023) | IA simbólica (reglas codificadas) | Diseño técnico | Reducción de errores y tiempo de estimación | Aplicabilidad limitada a geometrías complejas |
| Juszczuk et al. (2019) | Redes neuronales (ensemble) | Etapa conceptual | Alta precisión en predicción, reducción de errores | Dependencia de bases de datos bien estructuradas |
| Zima & Juszczuk (2021) | MLP, SVM, XGBoost | Etapa conceptual | Comparación de modelos, alto desempeño de XGBoost | Requiere bases de datos organizadas |
| (Saparamadu, 2025) | Modelo predictivo | Estimación preliminar | Mayor velocidad de cálculo, reducción de errores humanos | Fuente no académica; validación baja |
| (Castro Miranda et al., 2022) | Modelos de aprendizaje automático en análisis predictivo basados en análisis | Etapa temprana (diseño conceptual) | Mejora significativa en la precisión de estimaciones con información limitada | Requiere datos históricos estructurados; enfoques aún en desarrollo práctico |
| Choi et al. (2015) | Automatización semántica (no IA pura) | Diseño esquemático | Reducción de tiempo y errores en QTO | Dependencia del nivel de desarrollo del modelo BIM (IFC) |
| Widjaja & Kim (2023) | IA simbólica (reglas codificadas) | Diseño técnico | Reducción de errores y tiempo de estimación | Aplicabilidad limitada a geometrías complejas |
| Juszczuk et al. (2019) | Redes neuronales (ensemble) | Etapa conceptual | Alta precisión en predicción, reducción de errores | Dependencia de bases de datos bien estructuradas |
| Zima & Juszczuk (2021) | MLP, SVM, XGBoost | Etapa conceptual | Comparación de modelos, alto desempeño de XGBoost | Requiere bases de datos organizadas |
| Liu & Ma (2015) | Ontologías + NLP | Estructura de datos (pre-presupuestación) | Estandarización y formalización del conocimiento técnico | No genera resultados cuantitativos directos |

| Caso | Tipo de IA | Etapa del proyecto | Beneficios destacados | Limitaciones |
|-------------------------|---|-----------------------------------|---|--|
| (Q. Chen & Sheng, 2022) | Red neuronal artificial integrada con BIM | Planificación y control de costos | Incremento del 20% en eficiencia; mejor gestión de datos del proyecto | Aplicado en entorno simulado; requiere validación en obra real |

Nota: Elaboración propia.

El análisis de los estudios de caso desarrollados en este capítulo permitió identificar de manera estructurada las principales formas en que la inteligencia artificial está siendo aplicada en procesos de presupuestación dentro del sector construcción. A través de casos que combinan modelos predictivos, automatización de cantidades y estructuración de conocimiento, se logró evidenciar tanto los beneficios alcanzados como las condiciones necesarias para una adopción efectiva de estas tecnologías.

Entre los hallazgos más relevantes destaca el potencial de la IA para mejorar la precisión de las estimaciones, reducir errores manuales y acortar significativamente los tiempos de elaboración de presupuestos, especialmente en etapas tempranas del proyecto. Asimismo, se identificaron limitaciones importantes relacionadas con la calidad de los datos de entrada, la necesidad de estandarización y la integración con entornos digitales como BIM.

El análisis también permitió observar que las distintas técnicas de IA no se excluyen entre sí, sino que pueden actuar de manera complementaria, dependiendo del momento del ciclo de vida del proyecto y del tipo de información disponible. Esta flexibilidad representa una oportunidad para que las organizaciones desarrollen estrategias graduales de adopción, adaptadas a sus capacidades técnicas y operativas.

Tal como se estableció en la sección 3.6 del marco metodológico, este análisis de contenido se realizó a partir del instrumento diseñado en el Apéndice D, lo que permitió garantizar la coherencia entre los objetivos de investigación y los resultados obtenidos. La información extraída de los casos de estudio constituye un insumo clave para el diseño del marco de referencia propuesto en el siguiente capítulo, donde se consolidan las condiciones, criterios y buenas prácticas necesarias para la integración efectiva de IA en la presupuestación de proyectos de construcción.

4.3.5 Resultados del análisis comparativo de casos

El análisis comparativo de los cinco estudios de caso aplicados en la Categoría C permite identificar tendencias, patrones y condiciones críticas relacionadas con la aplicación de inteligencia artificial en los procesos de presupuestación de proyectos de construcción. La tabla presentada en la sección anterior sistematiza las principales variables y resultados obtenidos, con base en la herramienta del Apéndice E.

Uno de los hallazgos más relevantes es la diversidad de enfoques y tipos de IA aplicados. Se observan desde algoritmos simbólicos basados en reglas (Widjaja et al., 2023), hasta modelos de redes neuronales ensemble (Juszczak et al., 2019), métodos comparativos como XGBoost y SVM (Czarnecki & Lewiński, 2021), automatización semántica en entornos BIM (Choi et al., 2015) y técnicas de procesamiento de lenguaje natural y ontologías (Liu & Ma, 2015). Esta variedad responde a diferentes necesidades dentro del proceso presupuestario, y evidencia que no existe una solución única, sino un espectro de herramientas con diferentes niveles de madurez tecnológica.

Respecto a la precisión presupuestaria, los cinco casos reportan mejoras frente a métodos tradicionales. En cuatro de ellos, las desviaciones estimadas se reducen a márgenes inferiores al 10%, lo que sugiere un alto potencial de estas herramientas para fortalecer la confiabilidad de los presupuestos. Sin embargo, la precisión se ve condicionada por factores como la calidad de los datos, el nivel de desarrollo de los modelos BIM utilizados o la correcta configuración de los algoritmos.

En cuanto a la eficiencia, se reportan mejoras importantes en reducción de tiempos, especialmente en la extracción automatizada de cantidades y en la predicción temprana de costos. Esto se traduce en una optimización de recursos técnicos y humanos, y permite una toma de decisiones más ágil, en línea con los objetivos de eficiencia y control planteados por la gestión de costos moderna.

Por otra parte, el análisis permitió identificar limitaciones estructurales compartidas entre los casos: dificultades en la calidad de los datos, necesidad de estandarización, resistencia cultural al cambio tecnológico y alta demanda de conocimiento técnico especializado. Estas barreras coinciden con las evidenciadas en las entrevistas y encuestas del estudio, lo cual refuerza la consistencia del hallazgo a través de la triangulación metodológica.

En cuanto a las condiciones habilitadoras, la experiencia comparativa sugiere que la implementación exitosa de soluciones basadas en IA depende de factores como: capacitación previa, integración de procesos, soporte institucional, infraestructura tecnológica y disponibilidad de datos estructurados. Estas condiciones son necesarias para maximizar el rendimiento de las herramientas y asegurar su sostenibilidad en el tiempo.

Finalmente, estos resultados dan respuesta a las preguntas generadoras de la Categoría C, al mostrar claramente:

- La tipología diversa de IA existente aplicada al presupuesto (C1.1).
- Los beneficios y limitaciones observados en su implementación (C1.2).
- Las estrategias institucionales y técnicas que favorecen su adopción (C1.3).
- Algunas lecciones aprendidas que podrían servir de guía para futuras aplicaciones (C1.4).

Asimismo, los hallazgos se alinean con los objetivos específicos del estudio, al aportar evidencia empírica y validada sobre el estado actual, los desafíos y las oportunidades que presenta la incorporación de IA en la presupuestación. Esta información será fundamental para la construcción del marco de referencia propuesto en el capítulo 5, en el cual se pretende integrar los aprendizajes derivados de este análisis comparativo con los requerimientos reales de la industria. En el Cuadro 4.14. quedan registrados los principales hallazgos determinados de la aplicación de la herramienta de la matriz comparativa.

Cuadro 4.13. Aplicación de matriz comparativa (parte 1).

| Comparación | Caso 1: Widjaja et al. (2023) | Caso 2: Juszczuk et al. (2019) | Caso 3: Czarnecki & Lewiński (2021) | Caso 4: Choi et al. (2015) | Caso 5: Liu & Ma (2015) | Caso 6: Q. Chen & Sheng, (2022) | Caso 7: Castro Miranda et al., (2022) | Caso 8: Saparamadu, (2025) |
|--|--|---|---|---|---|---|---|--|
| Nombre de la Prueba/Experimento | Cuantificación automática de acero con algoritmo simbólico | Predicción de costos en estadios deportivos con redes neuronales ensemble | Comparación de modelos ML para estimación conceptual | QTO automático a partir de BIM mediante reglas semánticas | Formalización de estándares de presupuestación vía ontologías y NLP | Integración de red neuronal y BIM en estadio | Aplicación de ML en etapas tempranas | Aplicación práctica de IA predictiva |
| Objetivo del Experimento | Reducir errores y tiempo en cuantificación de acero en vigas | Predecir costos de construcción en fases tempranas | Determinar cuál modelo predice mejor en fases iniciales | Automatizar extracción de cantidades desde modelos BIM | Estandarizar el lenguaje técnico y semántico para IA | Optimizar la gestión de información y recursos en proyectos de estadios mediante IA y BIM | Analizar si modelos predictivos mejoran la estimación de costos con poca información disponible | Reducir errores humanos y acelerar la generación de estimaciones en proyectos reales |
| Ubicación (si aplica) | Indonesia | Polonia | Polonia | Corea del Sur | China | Integración de red neuronal y BIM en estadio | Aplicación de ML en etapas tempranas | Aplicación práctica de IA predictiva |
| Tipo de Prueba | Implementación experimental | Modelo estadístico con validación cruzada | Simulación comparativa | Implementación con prototipo | Propuesta conceptual aplicada | Optimizar la gestión de información y recursos en proyectos de estadios mediante IA y BIM | Analizar si modelos predictivos mejoran la estimación de costos con poca información disponible | Reducir errores humanos y acelerar la generación de estimaciones en proyectos reales |

| Criterio de Comparación | Caso 1: Widjaja et al. (2023) | Caso 2: Juszczak et al. (2019) | Caso 3: Czarnecki & Lewiński (2021) | Caso 4: Choi et al. (2015) | Caso 5: Liu & Ma (2015) | Caso 6: Q. Chen & Sheng, (2022) | Caso 7: Castro Miranda et al., (2022) | Caso 8: Saparamadu, (2025) |
|--|---|---|---|---|---|---|---|--|
| Método de Presupuestación Analizado | Algoritmo simbólico basado en reglas | Redes neuronales ensemble | MLP, SVM, XGBoost | Reglas semánticas sobre plataforma BIM | NLP y aprendizaje de ontologías | Red neuronal artificial integrada a plataforma BIM | Modelos ML (regresión, ANN, árboles de decisión) | Modelo predictivo no especificado (probable ML) |
| Precisión en Estimaciones con IA (%) | <5% | ±7% | 6-8% | <5% | ~10% | 20% | 7.6% | No cuantificada; testimonio indica mayor precisión |
| Eficiencia Presupuestaria (Escala 1-5) | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 5 | 4 | 3 |
| Tiempos de Presupuestación (reducción esperada) | Reducción del 30% en tiempo de cuantificación | Aceleración de fase de presupuesto preliminar en 20% | Predicciones más rápidas con XGBoost | Eliminación del trabajo manual en QTO | Mejor comunicación entre plataformas y agentes | Alta (20% de mejora en eficiencia general) | Moderada (no cuantificada en días) | Alta (reducción de tiempo en entrega de propuestas) |
| Principales Beneficios | Precisión, velocidad, reducción de errores | Detección de patrones complejos, predicciones más ajustadas | Robustez del modelo XGBoost, aplicabilidad general | Alta precisión, rapidez, replicabilidad | Complejidad técnica, difícil implementación inmediata | Automatización de análisis técnico; mejor interoperabilidad entre disciplinas | Mejor precisión desde fases conceptuales; apoyo a decisiones estratégicas | Aumento de velocidad y confianza en presupuestación; reducción de errores manuales |
| Limitaciones Encontradas | Requiere planos estandarizados | Dependencia de datos históricos representativos | Complejidad de configuración, riesgo de sobreajuste | Necesita modelos BIM bien estructurados | Requiere alineación terminológica sectorial | No aplicado en proyecto real; depende de plataformas BIM robustas | Dependencia de calidad de datos históricos; limitado uso práctico | Falta de evidencia cuantitativa formal; validación limitada |

| Criterio de Comparación | Caso 1: Widjaja et al. (2023) | Caso 2: Juszczyk et al. (2019) | Caso 3: Czarnecki & Lewiński (2021) | Caso 4: Choi et al. (2015) | Caso 5: Liu & Ma (2015) | Caso 6: Q. Chen & Sheng, (2022) | Caso 7: Castro Miranda et al., (2022) | Caso 8: Saparamadu, (2025) |
|----------------------------------|--|---|--|---|--|--|--|--|
| Barreras identificadas | Dificultad en adaptación a proyectos complejos | Curva de aprendizaje para ajuste de hiperparámetros | Infraestructura de datos, estandarización de variables | Dependencia del nivel de desarrollo BIM (LOD) | Validación técnica y semántica, respaldo institucional | Falta de validación en contexto constructivo real; recursos tecnológicos | Dificultades en recolección y estructuración de datos confiables | No está respaldado científicamente; percepción subjetiva |
| Condiciones habilitadoras | Capacitación técnica, digitalización de planos | Validación cruzada, segmentación previa | XGBoost superior en exactitud y velocidad | Soporte técnico y normalización previa | Propuesta con alto potencial a futuro | Uso conjunto con BIM; claridad en flujos de información digital | Capacidad de aplicar IA sin necesidad de datos exhaustivos | Experiencia en entorno real, aunque no documentado formalmente |
| Resultados obtenidos | Incremento en precisión de metrado de acero | Mejora leve en precisión frente a métodos tradicionales | Czarnecki & Lewiński (2021) | Mayor eficiencia y transparencia en QTO | Liu & Ma (2015) | Demuestra capacidad de la IA para optimizar planificación técnica | Validación alta basada en múltiples estudios revisados | Evidencia de adopción práctica con resultados operativos positivos |

Nota: Elaboración propia.

4.3.6 Análisis la Categoría C – Inteligencia Artificial

La presente sección integra y analiza los hallazgos más relevantes sobre el uso de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. A partir de la triangulación de cinco fuentes: revisión bibliográfica, encuestas estructuradas, entrevistas semiestructuradas, estudios de caso y análisis comparativo, se abordan cuatro subcategorías de la presente sección.

4.3.6.1 Tipología de IA existente

Los resultados evidencian una diversidad creciente en las tecnologías de IA aplicadas a la presupuestación, lo cual refleja un interés global por automatizar y mejorar los procesos tradicionales del sector construcción. A partir de la revisión bibliográfica y los estudios de caso, se identificaron principalmente cinco tipos de enfoques: redes neuronales artificiales (ANN), modelos de clasificación supervisada como XGBoost, SVM y Random Forest, algoritmos simbólicos basados en reglas, herramientas de procesamiento de lenguaje natural (NLP), y sistemas semánticos aplicados a modelos BIM.

Por ejemplo, Widjaja et al. (2023) presentaron un modelo simbólico basado en reglas que automatiza el metrado de planos, mientras que otros autores demostraron que los modelos predictivos supervisados permiten estimaciones precisas en etapas tempranas del proyecto. Asimismo, se presenta una integración semántica dentro de BIM para extraer cantidades de forma automatizada, y se han empleado ontologías combinadas con NLP para interpretar especificaciones técnicas y clasificarlas en partidas presupuestarias.

En paralelo, las entrevistas también reflejaron conocimiento parcial o incipiente sobre estas tecnologías por parte de los profesionales, aunque reconocieron su potencial en términos de eficiencia y precisión. Las encuestas estructuradas confirmaron que la mayoría de los encuestados a pesar de trabajar directamente con herramientas basadas en IA es un campo tan amplio que implica de una constante capacitación para lograr estar al corriente de las tendencias. Más, no obstante, casi ninguno de los encuestados tenía experiencia en el uso de IA para presupuestación.

La tipología de IA aplicada a presupuestos es amplia, aunque en distintas etapas de madurez. Algunas, como las redes neuronales o los algoritmos de clasificación, ya han sido validadas en múltiples contextos, mientras que otras, como las propuestas ontológicas, aún están en fase experimental o académica.

4.3.6.2 Beneficios y limitaciones

Los beneficios de aplicar IA en la presupuestación fueron consistentemente reportados en todas las fuentes de información. En primer lugar, se destaca la mejora en la precisión, al reducir los errores humanos asociados a procesos manuales y al permitir considerar múltiples variables y relaciones complejas. En segundo lugar, la IA permite mayor eficiencia operativa, ya que automatiza tareas como la extracción de cantidades, la clasificación de partidas o el análisis de riesgos presupuestarios, lo cual ahorra tiempo y recursos.

Otro beneficio identificado es la trazabilidad y transparencia en la toma de decisiones, al contar con modelos que documentan las fuentes y razonamientos utilizados para estimar costos. Además, algunas herramientas permiten realizar análisis probabilísticos o simulaciones, lo que facilita una mejor gestión de la incertidumbre y la planificación financiera más robusta.

Sin embargo, también se evidencian limitaciones relevantes. Entre las más señaladas destacan:

- La dependencia de datos históricos estructurados y confiables, sin los cuales los modelos no pueden entrenarse ni validar resultados.
- La falta de estandarización en procesos y nomenclatura presupuestaria, lo cual dificulta la interoperabilidad entre plataformas.
- La necesidad de conocimientos técnicos especializados, tanto para configurar los modelos como para interpretar adecuadamente sus salidas.
- Y, finalmente, una resistencia al cambio cultural dentro de las organizaciones, especialmente en equipos acostumbrados a metodologías tradicionales.

Estas limitaciones fueron destacadas en las entrevistas por la mayoría de los expertos consultados, y también confirmadas por las encuestas, donde más del 50% de los participantes indicaron que la principal barrera para implementar IA es la falta de conocimiento técnico y confianza en los resultados generados automáticamente.

Asimismo, los estudios de caso reflejaron que, incluso cuando las herramientas tecnológicas son robustas, su efectividad se ve limitada si no se insertan en entornos organizacionales que promuevan la calidad del dato, la capacitación y la colaboración interdisciplinaria.

4.3.6.3 Estrategias de implementación

El análisis triangulado revela que la adopción de inteligencia artificial en la presupuestación requiere mucho más que incorporar una herramienta tecnológica; implica una transformación sistémica que considere personas, procesos y cultura organizacional. A partir de la información obtenida, se identifican cinco estrategias clave para una implementación exitosa.

- a. Implementación progresiva mediante pilotos controlados: Tanto las entrevistas como los estudios de caso recomiendan iniciar la adopción con pequeños pilotos en tareas específicas y repetitivas (como el metrado o el análisis de costos históricos), donde el riesgo de error es controlado y el impacto puede medirse con claridad. Esta estrategia permite generar evidencia concreta, aumentar la confianza del equipo, y ajustar el sistema antes de escalarlo.
- b. Formación técnica y multidisciplinaria del personal: Un hallazgo recurrente en entrevistas, encuestas y bibliografía fue la necesidad de capacitar a los profesionales involucrados no solo en el uso de las herramientas, sino también en la lógica detrás de sus algoritmos. Esto incluye formación en interpretación de resultados, validación de modelos y manejo de datos. En particular, la integración de perfiles mixtos (técnicos de obra + analistas de datos) ha demostrado ser una estrategia efectiva en proyectos pioneros.
- c. Integración tecnológica con plataformas existentes (BIM, ERP, hojas de cálculo estructuradas): Los estudios de caso muestran que los mayores beneficios se obtienen cuando la IA no opera como una herramienta aislada, sino que se integra con flujos ya utilizados por la organización. La interoperabilidad entre herramientas permite evitar la duplicación de información y facilita la adopción sin cambiar radicalmente los procesos existentes.
- d. Acompañamiento institucional y cultura de innovación: La literatura y varios entrevistados coinciden en que las implementaciones más exitosas ocurren en entornos donde existe liderazgo institucional que respalda el cambio. Esto incluye disponibilidad de recursos, apoyo visible de la alta dirección, y espacios para experimentar sin penalización por errores iniciales.
- e. Validación continua y mejora iterativa: La implementación no termina con la puesta en marcha de un sistema. Se sugiere establecer procesos periódicos de revisión de resultados, retroalimentación con el equipo técnico y ajustes iterativos. Además, las encuestas

muestran que los profesionales confían más en las herramientas cuando estas son auditadas o validadas externamente, lo que refuerza la necesidad de transparencia y supervisión técnica.

En conjunto, estas estrategias proponen una ruta gradual, integradora y adaptativa para transitar desde los enfoques tradicionales hacia la presupuestación basada en inteligencia artificial.

4.3.6.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas

A partir de los casos documentados, la experiencia de expertos entrevistados y la revisión bibliográfica, emergen una serie de buenas prácticas que han demostrado facilitar o fortalecer la implementación de IA en presupuestación. Estas prácticas no solo mejoran el rendimiento de los sistemas, sino que también promueven su aceptación organizacional y sostenibilidad en el tiempo.

- a. Formalización y documentación del proceso presupuestario: Una condición recurrente en los casos exitosos fue contar con procesos bien estructurados, con pasos definidos y responsabilidades claras. Esto facilita tanto la codificación de reglas (en IA simbólica) como el entrenamiento de modelos basados en datos históricos. Documentar excepciones, decisiones clave y criterios de ajuste también es esencial para alimentar modelos explicables.
- b. Protocolos de calidad de datos y gobernanza de la información: Los sistemas de IA dependen de datos confiables. Por tanto, una práctica clave es establecer normas para el almacenamiento, limpieza y actualización de los datos. Esto incluye mantener bases de datos con precios actualizados, categorizaciones homogéneas y trazabilidad de los cambios realizados.
- c. Participación activa de los usuarios desde etapas tempranas: Tanto la literatura como las entrevistas recalcan que los usuarios deben involucrarse no solo en la fase final de prueba, sino desde la concepción de la herramienta. Esto permite alinear la funcionalidad con las necesidades reales del equipo, anticipar resistencias y construir un sentido de propiedad sobre el sistema.
- d. Inclusión de procesos de validación paralela y verificación de resultados: Especialmente en sectores como la construcción, donde las decisiones de costo tienen alto impacto, es clave que las herramientas de IA sean auditables. Una buena práctica es mantener una “doble verificación” durante los primeros ciclos de uso: comparar los resultados generados

por IA con los realizados por expertos humanos, analizar desviaciones y ajustar los algoritmos en consecuencia.

- e. Promoción de comunidades internas de aprendizaje e innovación: Varios entrevistados señalaron el valor de generar espacios de intercambio de experiencias dentro de la organización. Crear “comunidades de práctica” entre los equipos de presupuestación, tecnologías de la información y operaciones permite compartir errores, soluciones y aprendizajes, creando una cultura más receptiva a la innovación.

Lecciones aprendidas clave:

- La IA amplifica las capacidades humanas, pero no las reemplaza.
- Su implementación requiere condiciones organizacionales habilitadoras, no solo software.
- La resistencia al cambio puede reducirse si se demuestra valor práctico rápidamente.
- El liderazgo técnico y humano es tan importante como el desarrollo algorítmico.

Estas buenas prácticas permiten reducir la brecha entre el potencial de la tecnología y su adopción real, y constituyen un puente entre la teoría y la práctica que debe considerarse en cualquier estrategia de transformación digital del sector.

4.3.6.5 Síntesis del análisis

A continuación, en el Cuadro 4.16. se presenta un resumen de los principales hallazgos de la Categoría C:

Cuadro 4.14. Síntesis de hallazgos Categoría C.

| Subcategoría | Principales hallazgos |
|--|--|
| Tipologías actuales de IA aplicadas | <ul style="list-style-type: none"> • Se identifican principalmente IA predictiva y prescriptiva como las más relevantes en presupuestación. • El aprendizaje automático supervisado es el enfoque más común en herramientas disponibles. • Herramientas que combinan visión por computadora y procesamiento de lenguaje natural comienzan a emerger, aunque con baja adopción. |
| Beneficios | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de errores humanos en el cálculo de materiales y tiempos. • Mejora en la trazabilidad de los datos y decisiones presupuestarias. • Incremento en la velocidad de elaboración de presupuestos. • Mayor capacidad para modelar escenarios y estimar contingencias. |
| Barreras | <ul style="list-style-type: none"> • Falta de datos históricos estructurados y de calidad dificulta el entrenamiento de modelos precisos. • Resistencia cultural al cambio dentro de los equipos de presupuesto. • Dificultades para integrar herramientas de IA con sistemas ERP existentes. • Escasez de talento técnico en IA dentro de las empresas constructoras. |

| Subcategoría | Principales hallazgos |
|---|--|
| Estrategias de implementación utilizadas | <ul style="list-style-type: none"> • Implementación progresiva a través de pilotos en fases tempranas del proyecto. • Capacitación cruzada entre equipos técnicos y financieros. • Alianzas con proveedores tecnológicos para ajustar soluciones a las necesidades reales del sector. • Uso de validaciones manuales en etapas iniciales para construir confianza. |
| Lecciones aprendidas y buenas prácticas | <ul style="list-style-type: none"> • La transparencia en el funcionamiento del algoritmo facilita su adopción. • Las herramientas más efectivas son aquellas que se integran al flujo de trabajo existente sin sustituirlo completamente. • Es clave involucrar desde el inicio a los equipos de presupuesto para reducir resistencia. • Las buenas prácticas incluyen uso de <i>dashboards</i> intuitivos, alertas automáticas y trazabilidad de versiones. |

Nota: Elaboración propia.

4.4 Triangulación de resultados

Este apartado tiene como propósito integrar los hallazgos obtenidos en las categorías A, B y C, triangulando información proveniente de distintas fuentes de recolección de datos — entrevistas, encuestas, revisión documental y estudios de caso— y contrastando los enfoques analizados en los distintos contextos. Esta integración no solo fortalece la validez del estudio, sino que además permite identificar relaciones relevantes entre desafíos estructurales, herramientas existentes y nuevas soluciones emergentes basadas en inteligencia artificial.

Por un lado, en la Categoría A se identificaron obstáculos comunes que persisten en los proyectos de construcción: la fragmentación entre actores, la escasa estandarización en procesos, la resistencia al cambio organizacional y la falta de trazabilidad en el ciclo de vida del proyecto. Estas limitaciones afectan no solo la eficiencia operativa, sino también la capacidad de respuesta ante entornos cambiantes, lo cual repercute directamente en la calidad de la gestión de costos. En consecuencia, se establece una necesidad urgente de incorporar soluciones tecnológicas que faciliten la planificación y el control desde etapas tempranas.

A partir de este contexto, la Categoría B analizó cómo se lleva a cabo actualmente la gestión de costos en entornos donde no se ha implementado inteligencia artificial. Los resultados muestran que, si bien herramientas como Excel, S10 o Presto son ampliamente utilizadas, estas no logran integrarse eficientemente con otras áreas del proyecto, lo que genera procesos manuales, reprocesos y una escasa validación de datos. Más del 70% de los encuestados indicó que no existe trazabilidad entre el presupuesto inicial y los costos reales ejecutados, y los estudios de caso

revelaron que la estimación rara vez se conecta con el control presupuestario en obra. Esta situación sugiere que las herramientas actuales han alcanzado un techo funcional frente a las exigencias modernas del sector.

La Categoría C, por su parte, abordó experiencias donde ya se ha comenzado a implementar inteligencia artificial en la presupuestación. Se documentaron beneficios tangibles como la automatización del análisis de planos mediante visión por computadora, la predicción de costos más precisa usando aprendizaje automático, y el uso de procesamiento de lenguaje natural para interpretar especificaciones técnicas. Sin embargo, también se identificaron barreras críticas: la falta de datos estructurados para entrenar los modelos, la resistencia cultural a delegar decisiones a algoritmos, y la necesidad de talento técnico capacitado que entienda tanto del dominio de la construcción como de la lógica de los modelos de IA.

Al realizar una triangulación transversal, se observa que existe una alineación clara entre los desafíos detectados en la Categoría A, las limitaciones funcionales evidenciadas en la Categoría B y los aportes potenciales documentados en la Categoría C. Esta relación puede verse con mayor claridad en el Cuadro 4.17.:

Cuadro 4.15. Cuadro comparativo por categorías de estudio.

| Eje de análisis | Categoría A: Proyectos de construcción | Categoría B: Gestión del costo | Categoría C: IA |
|--|---|--|--|
| Desafíos identificados | Fragmentación en procesos. Escasa estandarización. Resistencia al cambio tecnológico. | Estimación desvinculada del control de ejecución. Poca trazabilidad de costos reales. | Dificultades para integrar IA a flujos existentes. Escasez de datos estructurados. |
| Limitaciones en herramientas actuales | No aplica (la categoría A describe el contexto, no herramientas). | Herramientas como Excel y S10 no se integran con otras fases del proyecto. Procesos manuales generan errores. | Las herramientas actuales con IA aún son poco adoptadas y dependen de datos de calidad. |
| Aportes potenciales de la IA | No aplica directamente, pero la categoría A establece el contexto problemático que la IA puede abordar. | No incorpora IA, pero establece qué aspectos deben mejorar para considerar una solución tecnológica. | Automatiza procesos repetitivos. Mejora precisión. Facilita toma de decisiones con datos. |

| Eje de análisis | Categoría A: Proyectos de construcción | Categoría B: Gestión del costo | Categoría C: IA |
|--|---|--|---|
| Condiciones necesarias para implementación efectiva | Cultura organizacional más abierta a la digitalización. Mejora en la planificación desde etapas tempranas. | Capacitación técnica en presupuestación. Procesos estandarizados de validación y trazabilidad. Integración entre áreas técnicas, administrativas y financieras. Mejora en la sistematización del flujo de información. Adopción gradual de herramientas robustas con acompañamiento técnico. | Integración progresiva y personalizada. Validación manual inicial para ganar confianza. Talento interdisciplinario. |

Nota: Elaboración propia.

Esta triangulación revela que muchas de las debilidades estructurales identificadas en las primeras dos categorías, como la baja trazabilidad, la fragmentación entre fases del proyecto y la ausencia de mecanismos automáticos de validación, pueden ser abordadas mediante soluciones basadas en inteligencia artificial, siempre y cuando se implementen de forma progresiva, ética y adaptada al contexto real de las organizaciones. Asimismo, se reconoce que la adopción de estas tecnologías no es solo un tema técnico, sino organizacional, donde la gestión del cambio, la capacitación y la calidad de los datos se vuelven factores determinantes para el éxito.

Finalmente, esta sección consolida los fundamentos empíricos y teóricos que respaldan la propuesta presentada en el capítulo 5, la cual busca ofrecer una hoja de ruta coherente y viable para la incorporación de IA en procesos de presupuestación en proyectos de construcción.

Capítulo 5 Propuesta de Solución

A partir de los hallazgos integrados en el capítulo anterior, este capítulo presenta los entregables establecidos en el Capítulo 1, buscando responder de manera concreta a los objetivos específicos de la investigación. Se considera los diferentes desafíos del sector, las limitaciones actuales de las herramientas utilizadas y el potencial demostrado por las soluciones basadas en inteligencia artificial, así como también, se plantea una hoja de ruta que permite avanzar hacia una presupuestación más precisa, eficiente y trazable mediante la implementación de Inteligencia Artificial. La propuesta se construye con base en la evidencia recabada y se orienta hacia una aplicación gradual, contextualizada y técnicamente viable.

5.1 Informe detallado sobre prácticas de Inteligencia Artificial actuales, destacando su impacto y áreas de oportunidad

Este entregable responde directamente al primer objetivo específico de la investigación: sintetizar las prácticas actuales de Inteligencia Artificial aplicadas a la elaboración de presupuestos de proyectos de construcción, mediante un análisis documental y el estudio de casos, evaluando los niveles de precisión y eficiencia requeridos por la industria. Este análisis constituye un insumo fundamental para la propuesta final del proyecto, ya que establece el punto de partida desde el cual se identifican brechas, oportunidades y posibilidades reales de implementación en el contexto latinoamericano.

A lo largo de este apartado se presenta una clasificación de herramientas tecnológicas disponibles, una evaluación de sus beneficios y desafíos, un estudio de su impacto actual en el sector y un mapeo de oportunidades emergentes. Esta información ha sido extraída del capítulo 4, particularmente de la categoría C, entrevistas, encuestas y revisión bibliográfica, y está organizada con un enfoque práctico, buscando orientar decisiones en empresas del sector.

5.1.1 Clasificación de herramientas de IA en presupuestación

La clasificación de las herramientas de IA en la presupuestación de proyectos de construcción ha evolucionado de manera significativa, reflejando el avance en la tecnología y la adopción de soluciones digitales en la industria. Los casos de estudio recientes y los estudios de literatura revisados proporcionan una visión más amplia sobre las diferentes tipologías de IA que se están implementando en la gestión de costos, y cómo cada una de estas herramientas se adapta

a las necesidades específicas de diferentes tipos de proyectos. Las herramientas utilizadas varían desde modelos predictivos basados en aprendizaje supervisado, hasta sistemas que emplean técnicas de procesamiento de lenguaje natural, visión por computadora y ontologías.

Las herramientas más comunes y empleadas para la presupuestación en la construcción incluyen:

1. *Machine Learning*: Utilizado principalmente para realizar predicciones de costos utilizando grandes volúmenes de datos históricos. Las plataformas de predicción de costos se han implementado en proyectos de gran escala con el objetivo de optimizar los tiempos de estimación y reducir los márgenes de error en las predicciones.
2. *Procesamiento de Lenguaje Natural*: Herramientas de NLP que se aplican principalmente para la lectura automática de documentos y la extracción de datos clave de especificaciones técnicas y pliegos. El NLP tiene la capacidad de predecir costos de construcción, y su uso promete ahorrar tiempo en la revisión de documentos, aunque requiere validación para garantizar la exactitud de los datos extraídos.
3. *Visión por Computadora*: La visibilidad automatizada de objetos en los planos, es útil para detectar elementos repetitivos en los planos arquitectónicos y de ingeniería. Aunque este tipo de IA todavía tiene una penetración limitada, su potencial es considerable, especialmente cuando se combina con modelos BIM.
4. *Sistemas Expertos y Plataformas Híbridas*: Las plataformas híbridas combinan IA con bases de datos históricas para ofrecer predicciones ajustadas. Estas herramientas se encuentran en expansión en mercados más maduros.

En el Cuadro 5.1. se pueden ver estas herramientas mayormente utilizadas en:

Cuadro 5.1. Resumen de herramientas de IA mayormente utilizadas.

| Tipo de IA | Herramienta / Enfoque | Aplicación en presupuestación | Nivel de adopción | Observaciones relevantes |
|-----------------------|-------------------------------------|---|-------------------|--|
| Machine Learning (ML) | Plataformas de predicción de costos | de Estimación de costos directos e indirectos | Medio-bajo | Utilizadas para mejorar la precisión en etapas tempranas del proyecto. |

| Tipo de IA | Herramienta / Enfoque | Aplicación en presupuestación | Nivel de adopción | Observaciones relevantes |
|---|--|---|-------------------|--|
| Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) | Análisis automatizado de especificaciones | Lectura de documentos de técnicos y extracción de datos clave | Bajo | Prometen ahorrar tiempo en revisión de pliegos, pero requieren validación. |
| Visión por Computadora | Reconocimiento de objetos en planos | Cuantificación automatizada desde planos PDF o BIM | Bajo | Útil para detectar elementos repetitivos, aún poco extendida. |
| Sistemas Expertos | Plataformas con reglas integradas | Recomendaciones sobre precios unitarios o rendimientos | Medio | Se utilizan como apoyo para profesionales con menor experiencia. |
| Plataformas híbridas | Software que combina IA con bases de datos | Integración de datos históricos y predicciones ajustadas | Medio-alto | Se encuentran en expansión en mercados más maduros. |

Nota: Elaboración propia.

La tipología de IA aplicada a la presupuestación de proyectos de construcción muestra una evolución significativa. Las tecnologías que inicialmente se consideraban experimentales ahora se están integrando de manera gradual en los flujos de trabajo del sector. Los modelos predictivos como los basados en *Machine Learning*, y las herramientas de NLP y visibilidad computacional, están tomando relevancia en distintas fases del ciclo de vida del proyecto, desde la estimación de costos en fases tempranas hasta la validación automatizada de materiales en etapas de construcción.

5.1.2 Impacto en la eficiencia y precisión de la presupuestación

El impacto de la inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción ha sido profundamente significativo. En términos de precisión y eficiencia, la implementación de IA ha mejorado sustancialmente los procesos de estimación de costos, transformando la forma en que las empresas de construcción realizan estimaciones y gestionan los recursos en diferentes fases del proyecto. Los principales impactos determinados en este estudio son:

1. Mejora en la precisión de las estimaciones

Una de las ventajas más claras de la IA es su capacidad para realizar predicciones de costos más precisas que los métodos tradicionales. En proyectos complejos y de gran escala, los modelos predictivos de aprendizaje automático han permitido reducir los márgenes de error en las estimaciones de costos. Esto se debe a que los modelos de IA analizan grandes volúmenes de datos históricos, que les permiten aprender de patrones pasados y realizar ajustes en tiempo real cuando las condiciones del mercado o del proyecto cambian.

2. Aceleración de los tiempos operativos

Otro impacto positivo significativo de la IA en la presupuestación es la reducción de los tiempos operativos. Los estudios muestran que el uso de herramientas automatizadas, como la lectura automatizada de planos o el análisis predictivo de costos, ha logrado acelerar los tiempos que los equipos técnicos dedican a la elaboración de presupuestos. En particular, las herramientas de visibilidad computacional y NLP, permiten una reducción del 30% en el tiempo de cuantificación de materiales mediante el uso de modelos BIM. Esta mejora en la velocidad de los procesos no solo ahorra tiempo, sino que también aumenta la eficiencia operativa, permitiendo a las empresas responder rápidamente a cambios de última hora en los proyectos.

3. Mayor fiabilidad y transparencia

La IA también ha mejorado la transparencia y la trazabilidad en los procesos de presupuestación. A medida que los modelos de IA recogen y analizan datos históricos, la capacidad de auditar y validar las estimaciones de costos se ha incrementado considerablemente. Esto es clave en proyectos de gran escala, donde los equipos necesitan tener acceso a una base de datos centralizada que les permita tomar decisiones informadas con bases objetivas. Los modelos híbridos también permiten mejorar la consistencia en las estimaciones a través de modelos predictivos, reduciendo el margen de error en la gestión de costos.

4. El rol complementario de la IA

Es importante destacar que, aunque la IA ha mostrado mejoras sustanciales en precisión y eficiencia, su efectividad depende de factores como la calidad de los datos y la capacitación del equipo técnico. La IA no reemplaza al juicio humano, sino que lo complementa. Los modelos de IA deben ser validados por expertos humanos, quienes no solo verifican los resultados, sino que también ajustan los modelos a las condiciones reales del proyecto. En este sentido, la IA se presenta

como una herramienta potente que potencia el criterio profesional, pero que siempre debe estar alineada con la experiencia y juicio de los profesionales del sector.

En resumen, el uso de IA en la presupuestación de proyectos ha demostrado tener un impacto positivo significativo en la precisión, eficiencia y transparencia de las estimaciones de costos. Sin embargo, para que estos beneficios se materialicen completamente, es esencial contar con datos de alta calidad, implementar procesos de validación continua y proporcionar capacitación a los equipos para asegurar una integración exitosa. La IA, aunque poderosa, sigue siendo una herramienta que debe ser utilizada en colaboración con el juicio humano, lo que garantiza que las decisiones basadas en estos modelos sean robustas y relevantes.

5.1.3 Beneficios y desafíos de la aplicación de IA en presupuestación

La integración de inteligencia artificial en el proceso de presupuestación en proyectos de construcción ha generado un considerable impacto positivo en la industria. Sin embargo, como ocurre con cualquier tecnología disruptiva, su implementación no está exenta de desafíos. A lo largo de los casos de estudio y la literatura revisada, se identificaron una serie de beneficios clave y desafíos que las empresas deben tener en cuenta al considerar la adopción de IA en sus procesos de gestión de costos.

a. Beneficios de la aplicación de IA en presupuestación

Uno de los beneficios más destacables de la IA es la mejora en la precisión de las estimaciones de costos. Los modelos de IA, especialmente los basados en aprendizaje automático, son capaces de analizar grandes volúmenes de datos históricos y extraer patrones ocultos que no podrían ser fácilmente identificados mediante métodos tradicionales. Esto resulta en estimaciones más precisas, incluso cuando la información disponible es limitada. Asimismo, los modelos de IA mejoran la exactitud de las predicciones, permitiendo que las empresas gestionen de manera más efectiva los recursos y ajusten los presupuestos de forma proactiva.

Además de la precisión, la IA también ha mostrado una reducción significativa en los tiempos operativos. Herramientas como la lectura automatizada de planos y la predicción de costos mediante modelos predictivos permiten a los equipos elaborar presupuestos de forma mucho más rápida, eliminando tareas repetitivas y ahorrando tiempo en la recopilación de datos. Este tipo de automatización también ayuda a las empresas a acelerar el proceso de licitación y responder más rápidamente a solicitudes de cambio durante el desarrollo del proyecto.

Otro beneficio clave es la mejora en la trazabilidad y la transparencia del proceso de presupuestación. La IA permite generar informes dinámicos y más precisos que se pueden rastrear y auditar fácilmente, lo cual es de gran importancia para grandes proyectos donde las decisiones deben estar basadas en datos verificables. En muchos casos, los modelos de IA ayudan a consolidar información dispersa en una base de datos centralizada, lo que proporciona mayor visibilidad y facilita la toma de decisiones informada

b. Desafíos de la aplicación de IA en presupuestación

A pesar de los beneficios mencionados, los estudios también identificaron varios desafíos clave que limitan la adopción de la IA en la presupuestación de proyectos de construcción. Uno de los principales desafíos es la calidad de los datos. Por su parte, la IA depende en gran medida de datos históricos bien estructurados para realizar predicciones precisas. En muchas empresas de construcción, los datos son incompletos, desorganizados o no están estandarizados, lo que dificulta la efectividad de los modelos de IA. Esta falta de calidad en los datos es una de las barreras más importantes que deben superar las empresas para poder aprovechar plenamente los beneficios de la IA.

Otro desafío señalado por los casos de estudio es la resistencia cultural al cambio. La adopción de IA en los procesos de presupuestación se enfrenta a menudo a resistencia interna, especialmente en empresas donde los equipos técnicos están acostumbrados a métodos tradicionales de trabajo. Esta resistencia, puede ser superada mediante formación técnica y gestión del cambio organizacional. Sin embargo, esto requiere tiempo y compromiso tanto de la alta dirección como del personal técnico.

Además, la interoperabilidad entre plataformas sigue siendo un desafío significativo. Muchos de los modelos de IA requieren integrarse con plataformas existentes como BIM y ERP. No obstante, las limitaciones tecnológicas actuales y la falta de estándares comunes dificultan la integración fluida entre estos sistemas. La falta de interoperabilidad entre sistemas puede retrasar la implementación de IA, ya que las plataformas de IA deben adaptarse a las especificaciones de las plataformas de gestión existentes.

En resumen, los beneficios de la IA en la presupuestación de proyectos de construcción son significativos. Se observa una mejora en la precisión de las estimaciones, una reducción de los tiempos operativos y una mejor trazabilidad en los procesos de presupuestación. Sin embargo, para

que estas ventajas se materialicen, las empresas deben superar desafíos clave, tales como la calidad de los datos, la resistencia cultural al cambio y la interoperabilidad entre sistemas.

Estos desafíos requieren un enfoque estratégico, con inversiones en infraestructura de datos, formación técnica y gestión del cambio organizacional. Las empresas que logren superar estas barreras podrán aprovechar plenamente el potencial de la IA, obteniendo mejores resultados en sus proyectos de presupuestación.

5.1.4 Áreas de oportunidad para el desarrollo de IA en presupuestación

A medida que la IA continúa su integración en la presupuestación de proyectos de construcción, se abren nuevas áreas de oportunidad que pueden mejorar significativamente tanto la eficiencia como la precisión en las estimaciones. El análisis de los casos de estudio y la revisión bibliográfica ha identificado varios aspectos clave que pueden potenciar el uso de la IA en la industria de la construcción.

- a. **Integración temprana de IA en el ciclo de vida del proyecto:** Una de las principales oportunidades identificadas es la integración de IA en las fases tempranas del ciclo de vida del proyecto, particularmente en la presupuestación conceptual. La predicción de costos en fases tempranas utilizando Machine Learning y redes neuronales permite mejorar la precisión de las estimaciones cuando los datos son limitados. Integrar IA en estas etapas iniciales podría proporcionar estimaciones más confiables y permitir a los equipos de proyecto tomar decisiones más informadas desde el principio, lo que ayudaría a reducir el riesgo de sobrecostos a lo largo del ciclo de vida del proyecto.
- b. **Desarrollo de soluciones locales:** Una oportunidad clave es el desarrollo de soluciones locales que consideren las normas, los precios unitarios y las prácticas contractuales propias de cada región o país. En países como Costa Rica y otras naciones latinoamericanas, la falta de estandarización en los precios y la diversidad de normativas locales pueden ser barreras para la implementación efectiva de IA. Los modelos de IA utilizados en otros mercados pueden no ser completamente aplicables sin ajustes locales. La creación de soluciones adaptadas a cada contexto no solo facilitaría la adopción de IA en la región, sino que también contribuiría a un mejor alineamiento con las realidades del mercado.

- c. **Interoperabilidad entre plataformas:** La interoperabilidad entre herramientas digitales como BIM, ERP y plataformas de IA es una de las áreas con más potencial para mejorar la eficiencia de los procesos de presupuestación. Los casos revisados demuestran que la integración entre BIM y IA para la extracción automática de cantidades (QTO) mejora significativamente la precisión de las estimaciones. La interoperabilidad entre plataformas de gestión (como ERP) y modelos BIM es fundamental para lograr una integración eficiente de la IA en todo el ciclo de vida del proyecto, permitiendo que los datos fluyan sin problemas entre las diferentes herramientas utilizadas en la gestión de proyectos.
- d. **Desarrollo de habilidades y capacidades técnicas:** Una de las áreas más importantes para el desarrollo de IA en presupuestación es la capacitación técnica. A pesar de los beneficios que ofrece la IA, la mayoría de las empresas en el sector de la construcción, especialmente en mercados emergentes, no cuentan con equipos suficientemente capacitados para gestionar y utilizar herramientas de IA de manera efectiva. La capacitación técnica es esencial no solo para entender cómo funciona la IA, sino también para interpretar sus resultados de manera adecuada y utilizarla dentro de los procesos de presupuestación de manera eficiente. Por lo tanto, invertir en la formación de equipos técnicos especializados es una oportunidad clave que debe ser aprovechada.
- e. **Automatización del proceso de licitación:** Otra área de oportunidad es la aplicación de IA en procesos de licitación pública, especialmente en la estandarización de los criterios de estimación. Los modelos de IA pueden mejorar la precisión en la elaboración de presupuestos preliminares y ayudar a crear estándares más claros para las ofertas. Las empresas podrían utilizar IA no solo para ajustar las estimaciones a condiciones cambiantes del proyecto, sino también para establecer criterios claros que faciliten la comparación entre ofertas de licitación. Esto podría contribuir a mejorar la transparencia y la competitividad en las licitaciones, al mismo tiempo que reducir los riesgos asociados a la subestimación o sobreestimación de los costos.
- f. **Fortalecimiento de la cultura organizacional basada en datos:** La cultura organizacional es otro aspecto clave para la adopción exitosa de IA. La resistencia

al cambio es un desafío significativo en muchas empresas de construcción. Fomentar una cultura de datos dentro de la organización puede ayudar a superar esta barrera. Las empresas deben promover el uso de IA no solo como una herramienta tecnológica, sino como una estrategia organizacional que potencia la toma de decisiones basada en datos. Esto incluye fomentar una mentalidad abierta al cambio y a la innovación.

En resumen, las áreas de oportunidad identificadas para el desarrollo de IA en presupuestación son variadas y abarcan desde la integración temprana de IA en las fases iniciales del ciclo de vida del proyecto hasta la adaptación de soluciones locales y el fortalecimiento de la cultura organizacional en torno a los datos. Aunque aún existen barreras técnicas y organizacionales, estas oportunidades ofrecen un gran potencial para optimizar el uso de IA en la presupuestación de proyectos de construcción. Las estrategias de adopción progresiva, la capacitación técnica y la interoperabilidad entre plataformas son factores clave para el éxito de estas soluciones tecnológicas en el futuro.

5.1.5 Herramienta práctica: Cuadro de selección de IA por tipo de empresa

Como parte del aporte aplicado de este entregable, se diseñó un cuadro de orientación para empresas del sector que deseen iniciar o fortalecer el uso de IA en presupuestación. Para efectos de esta investigación, la categorización de empresas en *pequeñas, medianas y grandes* se delimitó considerando tanto su nivel de madurez digital como la cantidad de recursos humanos y tecnológicos disponibles, siguiendo criterios adaptados de la OCDE (2021) y de estudios recientes en el sector construcción. De manera referencial, las empresas pequeñas corresponden a aquellas con menos de 50 colaboradores y recursos tecnológicos limitados; las medianas cuentan con entre 50 y 250 colaboradores y una infraestructura digital en proceso de consolidación; mientras que las grandes superan los 250 colaboradores, disponen de procesos digitalizados y mayor capacidad de inversión en innovación.

Cuadro 5.2. Recomendación de IA según tipología de empresa.

| Tipo de empresa | Nivel recomendado de IA | Aplicaciones sugeridas | Condiciones mínimas sugeridas |
|-----------------|--|---|---|
| Pequeña | Inicial (sistemas expertos, módulos simples) | Recomendación de ítems, rendimientos, comparación con bases históricas | Personal técnico con formación básica en software |
| Mediana | Intermedio (ML o visión por computadora en tareas clave) | Cuantificación automatizada, predicción de costos indirectos | Base de datos propia, apertura al cambio, tiempo de capacitación |
| Grande | Avanzado (plataformas híbridas integradas con BIM/ERP) | Estimación automatizada, validación cruzada, generación de reportes dinámicos | Equipo especializado, procesos digitalizados, liderazgo directivo claro |

Nota: Elaboración propia.

Este cuadro sintetiza los hallazgos y busca ofrecer un punto de partida realista, adaptado a distintos niveles organizacionales. El cuadro de selección propuesto en esta sección ofrece una guía práctica para que las empresas puedan elegir la tecnología de IA más adecuada según su nivel de madurez digital y sus condiciones actuales. Esta herramienta no solo facilita la adopción de IA en presupuestación, sino que también permite a las empresas tomar decisiones informadas sobre qué soluciones implementar en función de su tamaño, recursos y capacidades.

Recomendaciones específicas para cada tipo de empresa:

1. **Empresas pequeñas:** Para empresas pequeñas, es recomendable comenzar con herramientas más simples y de bajo costo que puedan integrarse rápidamente a los flujos de trabajo existentes. Los sistemas expertos y los módulos simples de IA (como los algoritmos de regresión o redes neuronales simples) pueden ser adecuados para mejorar la precisión en las estimaciones de costos directos e indirectos. Estas herramientas pueden ayudar a optimizar tareas repetitivas y proporcionar valor inmediato sin requerir inversiones significativas en infraestructura.
2. **Empresas medianas:** Las empresas medianas pueden beneficiarse de la adopción de IA más avanzada, como los modelos de aprendizaje automático o visión por computadora, que permiten realizar cuantificación automatizada y predicción de costos indirectos con mayor precisión. Para implementar estas herramientas, las empresas deberán contar con bases de datos propias y estar abiertas al cambio organizacional. Es importante que los equipos técnicos reciban la formación necesaria para aprovechar al máximo estas tecnologías y ajustar los modelos a las necesidades específicas de los proyectos.

3. Empresas grandes: Para empresas grandes, la adopción de plataformas híbridas que integran IA con BIM y ERP es la mejor opción. Estas herramientas avanzadas permiten realizar estimaciones automatizadas, validación cruzada y generación de reportes dinámicos en tiempo real, lo que mejora significativamente la eficiencia y la precisión del proceso de presupuestación. Sin embargo, estas herramientas requieren equipos especializados, procesos digitalizados y un liderazgo claro para asegurar que la implementación se realice de forma exitosa y que los sistemas sean interoperables con otras plataformas utilizadas en la empresa.

5.1.6 Consideraciones preliminares para el contexto costarricense

La adopción de IA en la presupuestación de proyectos de construcción no solo implica integrar herramientas tecnológicas avanzadas, sino también adaptarlas al contexto local de cada país o región. En el caso de Costa Rica, la implementación de IA en el sector de la construcción enfrenta desafíos específicos, pero también ofrece grandes oportunidades para transformar y mejorar los procesos de estimación de costos. Algunos de los principales desafíos son:

- Adaptación de herramientas internacionales: La mayoría de las herramientas de IA utilizadas en la presupuestación provienen de mercados internacionales, donde las condiciones de mercado, los precios unitarios y las normativas son diferentes. Las herramientas de IA desarrolladas en países con economías más maduras deben ser adaptadas para ajustarse a las condiciones locales de Costa Rica. Esto incluye ajustes en los precios unitarios de materiales, el rendimiento de las obras y las normativas locales de construcción.
- Infraestructura digital y estandarización de datos: El sector de la construcción en Costa Rica se encuentra en una etapa temprana de madurez digital, lo que implica que muchas empresas todavía utilizan procesos manuales o herramientas tradicionales como hojas de cálculo o software básico para la estimación de costos. Para implementar IA de manera efectiva, es necesario digitalizar los procesos, normalizar los datos y estructurarlos adecuadamente para que puedan ser utilizados por los sistemas de IA. Esta digitalización es un paso crucial, pero también una barrera importante que limita la adopción de estas tecnologías

- Capacitación y gestión del cambio organizacional: Otro desafío significativo es la falta de capacitación técnica en el sector. La resistencia al cambio y la falta de familiaridad con las tecnologías digitales son obstáculos comunes, especialmente en empresas con una cultura organizacional más tradicional. Para superar estos desafíos, es necesario invertir en programas de formación técnica y en gestión del cambio organizacional, asegurando que los equipos no solo comprendan cómo usar las herramientas de IA, sino que también adopten una mentalidad digital que valore la innovación y mejore la eficiencia operativa.

Oportunidades en el contexto costarricense:

- Potencial para la adopción de IA: A pesar de los desafíos, Costa Rica presenta un gran potencial para adoptar IA en la presupuestación de proyectos de construcción. El sector de la construcción está experimentando una transformación digital, y varias empresas están comenzando a incursionar en la automatización de sus procesos. Esto abre la oportunidad de integrar IA en las fases tempranas de los proyectos, especialmente en la estimación conceptual, donde la precisión de las estimaciones puede tener un gran impacto en la viabilidad financiera de los proyectos.
- Soluciones adaptadas a la región: Las soluciones de IA que se desarrollen en Costa Rica deben ser localizadas para considerar las particularidades del mercado y las normas locales. Esto incluye ajustar las estimaciones de costos a los precios locales, las prácticas contractuales y las normativas legales específicas del país. Además, la creación de modelos de IA adaptados a las realidades locales puede ser una ventaja competitiva para las empresas que deseen optimizar sus procesos de presupuestación en Centroamérica y otros mercados similares.
- Apoyo institucional y colaboración público-privada: El sector público en Costa Rica ha mostrado interés en impulsar la transformación digital dentro de la construcción, y existen iniciativas que pueden apoyar la adopción de IA en el sector. El gobierno podría jugar un papel crucial al fomentar políticas públicas que apoyen la digitalización y la innovación tecnológica en la construcción, proporcionando subvenciones o incentivos fiscales para la implementación de herramientas tecnológicas, especialmente en pequeñas y medianas empresas.

- Reforzamiento de la cultura organizacional: Uno de los factores más relevantes para el éxito de la adopción de IA en Costa Rica es el refuerzo de la cultura organizacional. Las empresas que logren implementar IA con éxito serán aquellas que promuevan una cultura de datos dentro de sus equipos técnicos. Esto implica no solo capacitar a los empleados en el uso de herramientas digitales, sino también en la importancia de tomar decisiones basadas en datos y en la interoperabilidad entre plataformas.

En resumen, la implementación de IA en la presupuestación en Costa Rica presenta tanto desafíos como oportunidades. Aunque la infraestructura digital y la capacitación técnica son áreas críticas que deben ser mejoradas, el sector costarricense tiene el potencial para adoptar soluciones de IA adaptadas a las necesidades locales. Con el apoyo adecuado de políticas públicas, la digitalización de los procesos y el refuerzo de la cultura organizacional, Costa Rica podría posicionarse como un líder en la adopción de IA en la presupuestación de proyectos de construcción en la región.

5.2 Análisis de limitaciones para la implementación de IA en presupuestación

Este entregable responde al segundo objetivo específico del proyecto: analizar las limitaciones técnicas, operativas y culturales que afectan la adopción de herramientas de Inteligencia Artificial en la gestión de costos, a través de una revisión teórica y entrevistas semiestructuradas con profesionales del sector. Además, se relaciona directamente con el segundo alcance del estudio, al clasificar de forma estructurada los obstáculos más relevantes identificados en el entorno.

Para su desarrollo, se retomaron los hallazgos del capítulo 4, especialmente de la categoría C, junto con los resultados de triangulación, entrevistas, encuestas y revisión documental. Asimismo, se integran reflexiones personales y herramientas aplicadas que buscan transformar estos hallazgos en acciones concretas para empresas del sector.

5.2.1 Limitaciones técnicas

Desde una perspectiva técnica, los principales desafíos para la adopción de IA en la presupuestación están ligados principalmente a la estructura y calidad de los datos. Como se evidencia en los resultados del Capítulo 4, las empresas del sector de la construcción aún enfrentan

dificultades con bases de datos mal estructuradas, no estandarizadas o incompletas, lo cual limita la efectividad de los modelos de IA. En muchos casos, los profesionales continúan utilizando hojas de cálculo independientes sin una trazabilidad adecuada, lo que impide la integración adecuada de herramientas de IA para la automatización del análisis.

Además, la validación de los resultados generados por IA sigue siendo un reto importante. Aunque los algoritmos de IA pueden generar estimaciones rápidas, se requiere supervisión humana para asegurar que los resultados sean precisos y aplicables a las circunstancias del proyecto. Esto refleja una dependencia híbrida, donde la IA y la intervención humana deben complementarse para asegurar la calidad de los presupuestos.

Por último, la interoperabilidad entre herramientas sigue siendo una barrera crítica. Muchos de los modelos de IA desarrollados no están completamente integrados con sistemas existentes, como BIM o ERP, lo que resulta en redundancias y duplicación de trabajo, disminuyendo la eficiencia operativa. Para solucionar esto, es necesario trabajar en la integración de IA con plataformas existentes mediante estándares abiertos y la creación de interfaces que permitan que los sistemas trabajen de forma conjunta y eficiente.

5.2.2 Limitaciones operativas

A nivel operativo, la falta de procesos estandarizados sigue siendo uno de los principales obstáculos para la implementación efectiva de IA en la presupuestación. En un gran porcentaje de los casos revisados, la estimación de costos depende de criterios individuales y no de procesos sistematizados, lo que dificulta la automatización de tareas. Los resultados de las entrevistas confirmaron que más del 70% de los participantes indicaron que no existen procedimientos formales ni bases de conocimiento internas, lo que genera descoordinación en las tareas.

Además, muchas de las herramientas disponibles en el mercado no responden a las necesidades locales. Las soluciones internacionales que ofrecen algunas plataformas no están adaptadas a variables como precios regionales, tipos de contratación o métricas específicas que se manejan en el país, lo que genera limitaciones en su efectividad. En este sentido, las herramientas que utilizan datos históricos locales y que adaptan los modelos predictivos a las realidades del contexto costarricense tienen un potencial más alto de ser adoptadas de forma exitosa.

Finalmente, una de las principales limitaciones operativas es la falta de capacitación técnica del personal. En muchas empresas, especialmente las pequeñas y medianas, los equipos de

presupuestación no han sido capacitados en tecnologías digitales, lo que genera una dependencia de consultores externos o una curva de aprendizaje prolongada. Esta falta de preparación técnica retrasa la implementación y optimización de las herramientas de IA. Para abordar esta barrera, se recomienda la creación de programas de capacitación progresiva que incluyan entrenamiento práctico y asesoría especializada.

5.2.3 Limitaciones culturales

Desde una perspectiva cultural, la resistencia al cambio es un desafío significativo en el proceso de adopción de IA. Algunos profesionales experimentados en la industria de la construcción temen que la IA pueda desplazar su conocimiento, lo que crea una barrera psicológica en su adopción. Este temor es especialmente notable en entornos donde las tareas han sido realizadas de manera tradicional durante muchos años.

Además, la falta de referentes cercanos o experiencias locales exitosas contribuye a que la IA sea vista más como una amenaza que como una herramienta valiosa. En Costa Rica, en particular, no existen suficientes ejemplos concretos de empresas que hayan integrado IA con éxito, lo que dificulta la toma de decisiones y genera desconfianza en la tecnología. Para superar esta barrera, es crucial presentar casos de éxito locales y testimonios reales de empresas que hayan adoptado IA con éxito, destacando tanto los beneficios como los aprendizajes de esos procesos.

5.2.4 Herramienta práctica: Guía de mitigación de barreras

Como aporte aplicado de este entregable, se propone una herramienta concreta para ayudar a las empresas a identificar las barreras más comunes en la implementación de IA en presupuestación y, sobre todo, actuar sobre ellas de forma realista. La guía se organiza según el tipo de empresa y su nivel de madurez digital, con estrategias prácticas adaptadas a sus condiciones operativas.

Cuadro 5.3. Guía de mitigación de barreras.

| Tipo de empresa | Barreras frecuentes | Estrategias recomendadas |
|-----------------|---|--|
| Pequeña | <ul style="list-style-type: none"> -Bajo conocimiento técnico. -Miedo al reemplazo profesional. -Falta de datos organizados | <ul style="list-style-type: none"> -Realizar sesiones de sensibilización internas para explicar qué es IA y cómo se complementa con el trabajo humano. -Empezar con herramientas simples (por ejemplo, sistemas expertos con recomendaciones automatizadas o asistentes de costos). -Usar hojas de cálculo estructuradas como punto de partida para organizar bases de datos que permitan aplicar IA progresivamente. |
| Mediana | <ul style="list-style-type: none"> - Procesos no estandarizados- Herramientas no integradas- Escasa capacitación digital | <ul style="list-style-type: none"> - Mapear el flujo actual de presupuestación para identificar cuellos de botella donde IA podría apoyar. - Adoptar plataformas que permitan integración progresiva (por módulos) con sistemas existentes como ERP o bases de datos propias. - Crear una hoja de ruta interna para capacitar al equipo técnico en tecnologías digitales aplicadas. |
| Grande | <ul style="list-style-type: none"> - Fricción cultural entre departamentos- Baja alineación entre estrategia y operación- Subutilización de tecnologías adquiridas | <ul style="list-style-type: none"> - Establecer un programa formal de gestión del cambio que incluya liderazgo activo, embajadores digitales y espacios de escucha. - Garantizar la interoperabilidad entre IA y sistemas robustos como BIM o ERP mediante estándares comunes. - Crear comités mixtos (presupuesto + innovación) para asegurar que la herramienta sea usada con propósito estratégico. |

Nota: Elaboración propia.

Esta herramienta proporciona una guía realista y adaptada a las condiciones específicas de cada empresa para que puedan superar las barreras comunes en la adopción de IA. Al identificar

las barreras más relevantes y sugerir estrategias específicas, esta guía sirve como un punto de partida práctico para la implementación progresiva de IA en los procesos de presupuestación.

5.2.5 *Tabla visual: Impacto y frecuencia de las barreras identificadas*

Con el fin de ofrecer una visión más estratégica de las principales barreras identificadas, se presenta a continuación una tabla tipo semáforo que clasifica las barreras en función de su frecuencia de aparición en los datos recopilados y su nivel de impacto en el proceso de presupuestación. Esta visualización permite priorizar acciones de mitigación según su urgencia y complejidad.

Cuadro 5.4. Tabla tipo semáforo de clasificación de barreras según su frecuencia e impacto.

| Barrera | Alta frecuencia | Alto impacto | Descripción operativa | Recomendación prioritaria |
|-----------------------------------|-----------------|--------------|---|--|
| Falta de datos estructurados | ✓ | ✓ | La mayoría de las empresas no cuenta con bases de datos organizadas o estandarizadas. | Implementar procesos de recolección, depuración y estructuración de datos históricos. |
| Resistencia al cambio cultural | ✓ | ✓ | Temor a ser reemplazado, desconfianza o apatía hacia nuevas herramientas. | Promover liderazgo activo, capacitación continua y casos de éxito internos. |
| Falta de liderazgo técnico | ✓ | ✓ | Ausencia de referentes que impulsen el uso de IA desde la estrategia. | Identificar líderes internos y asignar responsabilidades claras en procesos de adopción. |
| Interoperabilidad limitada | ✓ | ✓ | Los sistemas no "conversan" entre sí, generando duplicidad y errores. | Priorizar plataformas abiertas o con capacidad de integración progresiva. |
| Recursos económicos insuficientes | ✓ | ✓ | Falta de presupuesto para licencias, formación o consultoría especializada. | Diseñar pilotos escalables con retorno de inversión medible y acceso a fondos externos. |
| Ausencia de regulación específica | ✗ | ✓ | No existen lineamientos legales que validen o regulen el uso de IA en presupuestos. | Impulsar mesas técnicas multisectoriales para establecer marcos de referencia claros. |

Nota: Elaboración propia.

Como puede observarse, las barreras más críticas son aquellas que combinan alta frecuencia y alto impacto, y que además tienen efectos sistémicos en toda la organización. Por lo tanto, deben ser abordadas desde un enfoque integral, que no solo contemple la tecnología, sino también los procesos, las personas y la cultura organizacional.

Esta tabla busca ser un punto de partida para establecer prioridades de acción y diseñar planes de implementación adaptados al entorno real de cada empresa.

5.2.6 Consideraciones finales para el contexto costarricense

A la luz del análisis realizado, es evidente que las barreras a la adopción de IA no se deben únicamente a la falta de tecnología, sino a una combinación compleja de factores estructurales, operativos y culturales que se entrelazan en el día a día de las empresas del sector construcción en Costa Rica.

En primer lugar, los datos obtenidos confirman que muchas organizaciones trabajan aún con métodos tradicionales que priorizan la ejecución sobre la innovación. Esta realidad limita los espacios de experimentación con nuevas herramientas y dificulta que la IA sea vista como una aliada estratégica.

Por otro lado, se detectó una carencia generalizada de referentes técnicos internos que impulsen activamente la transformación digital desde las áreas de presupuesto. Esta ausencia de liderazgo técnico deja el impulso del cambio en manos externas o en iniciativas aisladas, lo cual reduce su sostenibilidad en el tiempo.

Asimismo, el contexto costarricense se caracteriza por una estructura empresarial fragmentada, con un alto porcentaje de pequeñas y medianas empresas que enfrentan limitaciones tanto presupuestarias como técnicas. Para estas organizaciones, la implementación de IA no será posible sin acompañamiento, formación adaptada y soluciones accesibles.

En este escenario, se vuelve indispensable promover un enfoque realista y progresivo de adopción tecnológica. Las iniciativas más exitosas serán aquellas que logren conectar las capacidades internas con la visión estratégica, integrando herramientas de IA de manera gradual, contextualizada y alineada con los procesos reales de cada organización.

Finalmente, es importante destacar que las soluciones deben surgir del propio sector. No basta con importar tecnologías: es necesario construir conocimiento local, desarrollar capacidades

internas y crear espacios de validación en los que los profesionales puedan confiar. La inteligencia artificial en presupuestación no debe verse como una meta lejana, sino como una evolución lógica y alcanzable del rol del presupuestista en el marco de una gestión de proyectos más eficiente, precisa e inteligente.

Con esto se concluye el segundo entregable del proyecto, aportando un análisis profundo, contextualizado y con herramientas útiles que permiten comprender y afrontar los principales retos asociados a la implementación de IA en presupuestación.

5.3 Informe de análisis comparativo de casos de éxito en la aplicación de IA en la gestión de proyectos de construcción

Este entregable responde al objetivo específico número tres de la investigación, que tiene como propósito extraer lecciones aplicables a la presupuestación mediante un análisis comparativo entre casos de éxito en la aplicación de IA en diversas áreas de la gestión de proyectos de construcción. El análisis realizado se basa en los hallazgos presentados en los capítulos 1, 2 y 4, los cuales proporcionan el contexto teórico y metodológico necesario, así como las fuentes de información relevantes utilizadas en este estudio.

El propósito principal de este análisis es identificar las buenas prácticas y reconocer oportunidades de mejora para optimizar la adopción de IA en la gestión de costos, específicamente en la presupuestación de proyectos de construcción. Este informe no solo sintetiza los hallazgos clave de los estudios, sino que también proporciona recomendaciones específicas para fortalecer el uso de la IA en este ámbito, con el fin de mejorar los procesos de estimación de costos.

5.3.1 Análisis comparativo de casos de éxito

El análisis comparativo se fundamenta en los ocho casos de éxito seleccionados, los cuales abarcan distintas fases del proyecto y emplean diversas herramientas de inteligencia artificial. Entre ellos se incluyen desde enfoques simbólicos basados en reglas hasta modelos predictivos avanzados como redes neuronales, algoritmos de *boosting* y sistemas integrados con plataformas BIM. Esta variedad tecnológica ha permitido observar cómo la IA se adapta a múltiples contextos dentro de la gestión de proyectos, aportando valor tanto en procesos específicos como en estrategias más integrales de presupuestación.

En conjunto, los casos reflejan una tendencia clara hacia la mejora de la precisión en las estimaciones y la reducción de errores manuales. Al automatizar tareas repetitivas como la cuantificación de materiales o la predicción de costos en fases iniciales, las soluciones basadas en IA han contribuido significativamente a optimizar los tiempos de presupuestación y a fortalecer la toma de decisiones informadas. Por ejemplo, Czarnecki & Lewiński (2021) reportaron mejoras notables al aplicar XGBoost en estimaciones conceptuales, mientras que Q. Chen & Sheng (2022) evidenciaron un aumento del 20% en la eficiencia general de gestión gracias a la integración entre redes neuronales e información BIM. Asimismo, Castro Miranda et al. (2022) identificaron una reducción del error medio absoluto hasta 7.6% al aplicar modelos predictivos en contextos de alta incertidumbre.

Casos como los de Juszczuk et al. (2019), Liu & Ma (2015) y Castro Miranda et al. (2022) coinciden en resaltar la utilidad de la IA durante las fases tempranas del proyecto, cuando la información disponible es limitada. Este enfoque es particularmente valioso en entornos complejos, donde anticiparse a variaciones de mercado o condiciones inesperadas puede marcar una diferencia sustancial en el control de costos. Por otro lado, experiencias como la de Saparamadu (2025) muestran que incluso en entornos no académicos, la IA puede implementarse de forma efectiva para acelerar procesos de estimación y reducir errores humanos, lo cual evidencia su aplicabilidad directa en contextos reales.

5.3.2 Áreas de oportunidad para mejorar la adopción de IA en presupuestación

Los casos de estudio analizados permiten identificar diversas áreas de oportunidad que pueden fortalecer la adopción de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. Estas oportunidades no solo reflejan desafíos técnicos, sino también consideraciones estratégicas y organizacionales que deben atenderse para que la integración de estas tecnologías sea realmente efectiva.

- **Interoperabilidad entre plataformas – brechas identificadas:** La necesidad de conectar herramientas de IA con sistemas existentes como BIM, ERP o bases de datos de costos es un factor recurrente. Casos como el de Q. Chen & Sheng (2022) evidencian cómo la integración con modelos BIM puede mejorar significativamente la eficiencia del proyecto. No obstante, la brecha entre la teoría y la práctica radica en que, mientras la literatura plantea un escenario de integración

fluida y automatizada, en la realidad muchas organizaciones carecen de estructuras de datos estandarizadas, procesos digitalizados y personal especializado en gestión de la información. A esto se suma la resistencia cultural y los altos costos iniciales de inversión, lo cual convierte la interoperabilidad en un desafío que pocas empresas logran materializar en la práctica, a pesar de su potencial comprobado en estudios académicos.

- **Adaptabilidad al contexto local:** En estudios como el de Czarnecki & Lewiński (2021), se observa que los modelos de IA deben ajustarse a las condiciones específicas de cada entorno, considerando precios locales, normativas regionales y disponibilidad de datos. La falta de contextualización puede limitar la precisión de las estimaciones y generar resultados poco confiables.
- **Aplicación en fases tempranas del proyecto:** Una oportunidad crítica se encuentra en el uso de IA cuando los proyectos aún se encuentran en fases de diseño conceptual o anteproyecto. Los casos de Juszczak et al. (2019) y Castro Miranda et al. (2022) demuestran que incluso con información limitada, los modelos predictivos pueden aportar proyecciones útiles que apoyen la toma de decisiones estratégicas, anticipándose a desviaciones presupuestarias.
- **Validación práctica y cultural dentro de las organizaciones:** El caso de Saparamadu (2025) muestra cómo, incluso sin un respaldo académico riguroso, la IA puede ser implementada con éxito en contextos reales, siempre que exista una aceptación organizacional y una cultura orientada a datos. Este tipo de adopción no implica una mejora técnica del algoritmo, sino una mejora en la efectividad de su implementación, al evidenciar que la tecnología por sí sola no es suficiente: es necesario acompañarla de procesos de cambio interno y formación continua que permitan consolidar su uso dentro de la organización.
- **Definición de criterios de evaluación claros:** Para consolidar el uso de IA en presupuestación, es clave que las empresas establezcan métricas concretas de desempeño, tanto técnicas como estratégicas. Estas métricas deben permitir monitorear el impacto de los modelos en términos de precisión, ahorro, confiabilidad y utilidad para los equipos de proyecto.

En conjunto, estas áreas de oportunidad invitan a pensar en la adopción de IA no solo como una mejora tecnológica, sino como una transformación progresiva que debe adaptarse al contexto, facilitar la interoperabilidad, fomentar la confianza del equipo y traducirse en beneficios tangibles en los procesos de estimación de costos.

5.3.3 Buenas prácticas identificadas y su aplicabilidad presupuestaria

A partir del análisis de los ocho casos seleccionados, fue posible identificar una serie de buenas prácticas que pueden ser replicadas o adaptadas al ámbito de la presupuestación de proyectos de construcción. Estas prácticas no solo tienen valor técnico, sino también organizacional, y contribuyen a generar condiciones más favorables para una adopción efectiva de herramientas basadas en inteligencia artificial.

1. **Documentación detallada del proceso de estimación:** Registrar de forma estructurada las decisiones, insumos y parámetros empleados en la elaboración de presupuestos permite mejorar la trazabilidad, reducir ambigüedades y alimentar modelos de IA con datos de mayor calidad. Esta práctica facilita también auditorías internas y procesos de mejora continua.
2. **Validación cruzada entre IA y criterio humano:** Comparar los resultados generados por modelos de IA con estimaciones realizadas por profesionales del área sigue siendo una práctica clave para generar confianza y detectar inconsistencias. Casos como el de Widjaja et al. (2023), aunque con menor formalidad académica, muestran cómo esta comparación directa puede acelerar la aceptación de la herramienta y su integración en procesos reales.
3. **Fomento de una cultura organizacional orientada a los datos:** Tal como evidencian los trabajos de Juszcyk et al. (2019) y Castro Miranda et al. (2022), las organizaciones que priorizan la estructuración, actualización y uso consciente de sus datos históricos están mejor posicionadas para aprovechar las capacidades de la inteligencia artificial, especialmente en la presupuestación.
4. **Adopción modular y progresiva:** Iniciar con aplicaciones acotadas —como la automatización de tareas específicas o el uso de IA en fases tempranas— permite ajustar los modelos y procesos antes de escalar su aplicación a nivel organizacional. Esta estrategia fue especialmente visible en los casos de Liu & Ma (2015) y en entornos simulados como el de Q. Chen & Sheng (2022).

5. **Involucramiento temprano de los usuarios clave:** Incluir al personal técnico y operativo desde la etapa de diseño e integración de las herramientas incrementa notablemente la aceptación interna. Esta participación temprana no solo mejora la alineación con los objetivos del proyecto, sino que también reduce la resistencia al cambio tecnológico.

Estas buenas prácticas, observadas en contextos diversos, permiten delinear lineamientos concretos para el desarrollo e implementación de soluciones basadas en IA aplicadas a la presupuestación. Además, contribuyen a cerrar la brecha entre el potencial tecnológico y su adopción real dentro de las dinámicas del sector construcción.

5.3.4 Recomendaciones para optimizar el uso de IA en la gestión de costos

A partir del análisis comparativo de los casos de estudio presentados, y considerando las áreas de oportunidad y buenas prácticas identificadas, se proponen a continuación una serie de recomendaciones concretas para optimizar el uso de inteligencia artificial en la gestión de costos de proyectos de construcción. Estas recomendaciones buscan ser aplicables, progresivas y adaptables al contexto específico de cada organización, sin perder de vista los desafíos técnicos y culturales que acompañan la incorporación de nuevas tecnologías.

1. **Iniciar con una fase de diagnóstico y alfabetización digital:** Antes de implementar herramientas basadas en IA, es necesario realizar un diagnóstico del estado actual de los procesos de presupuestación, capacidades tecnológicas y cultura de datos de la organización. Esto permite establecer una línea base realista y definir prioridades. Además, es recomendable realizar sesiones de sensibilización para familiarizar al equipo con los conceptos clave de IA, su alcance y sus límites.
2. **Seleccionar aplicaciones con alto impacto y baja complejidad inicial:** Los casos analizados demuestran que iniciar con soluciones específicas —como modelos predictivos para estimaciones preliminares o herramientas de extracción automática de cantidades— facilita la validación de resultados y genera confianza progresiva en la tecnología. Estas aplicaciones deben seleccionarse en función de su potencial de mejora inmediata y su facilidad de integración con los procesos existentes.
3. **Promover la colaboración entre perfiles técnicos y analíticos:** La integración de IA en la presupuestación requiere la articulación entre especialistas en construcción, personal técnico de costos y profesionales en ciencia de datos. Esta colaboración debe ir más allá

del desarrollo puntual de modelos e incluir procesos de co-creación, retroalimentación continua y validación conjunta de resultados.

4. **Establecer protocolos de evaluación y mejora continua:** Es fundamental que las organizaciones definan criterios concretos para evaluar el desempeño de las herramientas de IA, incluyendo indicadores de precisión, ahorro de tiempo, utilidad operativa y aceptación por parte de los equipos. Estos criterios deben permitir ajustes ágiles en función de los aprendizajes obtenidos en cada implementación.
5. **Aprovechar alianzas externas para fortalecer capacidades.** La colaboración con universidades, centros de investigación y proveedores especializados puede acelerar el proceso de adopción de IA y aportar una base metodológica más sólida. Además, permite el acceso a modelos previamente entrenados, datos abiertos y experiencias comparables que pueden servir como punto de partida para el diseño de soluciones propias.

Estas recomendaciones no deben entenderse como un recetario único, sino como un conjunto de lineamientos que pueden adaptarse a distintos niveles de madurez digital y organizacional. Su implementación progresiva y estratégica puede abrir el camino para una transformación real en la forma en que se gestionan los costos en los proyectos de construcción.

5.3.5 Ruta progresiva para la adopción de IA en presupuestación

Si bien los beneficios del uso de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción son evidentes, su adopción efectiva no ocurre de forma inmediata ni automática. Tal como se observa en los casos analizados, las organizaciones que lograron implementar soluciones basadas en IA con éxito lo hicieron mediante procesos graduales, comenzando con iniciativas focalizadas y evolucionando hacia integraciones más profundas y estructurales. Por ello, a continuación, se propone una hoja de ruta que puede guiar la adopción progresiva de IA en presupuestación, tomando en cuenta los aprendizajes extraídos del análisis comparativo.

Esta ruta está estructurada en cuatro etapas secuenciales que contemplan tanto aspectos técnicos como organizacionales, e incluye para cada una un objetivo principal y un conjunto de acciones clave.

El Cuadro 5.5. resume una hoja de ruta estructurada en cuatro etapas para guiar la adopción progresiva de IA en presupuestación, basada en los hallazgos de los casos de estudio analizados. Para cada etapa se detalla su objetivo principal y las acciones clave recomendadas.

Cuadro 5.5. Hoja de ruta estructurada para la adopción de IA.

| Etapa | Objetivo principal | Acciones clave |
|------------------------------|--|---|
| Exploración | Sensibilizar al equipo y diagnosticar el estado actual | <ul style="list-style-type: none"> - Realizar un diagnóstico de capacidades tecnológicas, procesos y cultura de datos. - Ofrecer sesiones introductorias sobre IA y su potencial en presupuestación. - Identificar brechas y oportunidades a corto plazo. |
| Piloto controlado | Implementar una funcionalidad acotada para validar su utilidad | <ul style="list-style-type: none"> - Seleccionar una herramienta específica (por ejemplo, modelo de predicción temprana o extracción automática de cantidades). - Ejecutar una prueba en un entorno controlado o proyecto de baja complejidad. - Comparar resultados con estimaciones tradicionales. |
| Ajuste y escalamiento | Optimizar resultados y extender el uso a nuevos proyectos o procesos | <ul style="list-style-type: none"> - Ajustar parámetros del modelo con base en retroalimentación interna. - Formar equipos interdisciplinarios permanentes. - Iniciar integración con sistemas como BIM o ERP en proyectos seleccionados. |
| Integración plena | Incorporar la IA como parte estratégica del sistema de gestión de costos | <ul style="list-style-type: none"> - Establecer políticas internas para uso de IA en presupuestación. - Medir el impacto en tiempo, precisión y costos. - Fomentar una cultura de mejora continua basada en datos. |

Nota: Elaboración propia.

Esta hoja de ruta no pretende ser una receta única, sino una guía adaptable a la realidad de cada organización. Lo fundamental es reconocer que la incorporación de IA en la presupuestación no es únicamente una decisión tecnológica, sino una transformación cultural y operativa que debe construirse paso a paso, con visión estratégica y aprendizajes constantes. Los casos revisados demuestran que este tipo de adopción gradual permite validar resultados, construir confianza interna y asegurar la sostenibilidad de las soluciones implementadas.

5.3.6 Cierre del informe

A lo largo de este entregable se ha desarrollado un análisis detallado y comparativo de ocho casos de éxito en la aplicación de inteligencia artificial en proyectos de construcción, con énfasis en su aplicabilidad en procesos de presupuestación. A partir de este análisis, se identificaron patrones comunes, desafíos técnicos y organizacionales, así como una serie de buenas prácticas que pueden ser adoptadas o adaptadas por empresas del sector según su contexto. Las recomendaciones propuestas y la hoja de ruta de adopción progresiva responden directamente al objetivo específico número tres de esta investigación, al traducir la evidencia recopilada en lineamientos prácticos para optimizar el uso de IA en la gestión de costos.

De manera complementaria, la siguiente tabla sintetiza las principales lecciones aprendidas de cada uno de los casos analizados, destacando su valor práctico y su relación con las categorías metodológicas definidas en el Capítulo 3. Esta síntesis cierra el ciclo del análisis y sirve de base para el desarrollo de la propuesta final que se presentará en el siguiente capítulo.

Cuadro 5.6. Síntesis de aprendizajes clave de los casos de estudio.

| Nº | Caso (autor y año) | Lección aprendida | clave | Aplicabilidad práctica en presupuestación | Categoría metodológica relacionada |
|----|-----------------------------|--|-------|--|--------------------------------------|
| 1 | Widjaja et al. (2023) | Validación cruzada entre IA y estimación humana | | Reducción de errores en la cuantificación automatizada de acero | C (tipología de IA aplicada) |
| 2 | Juszczyk et al. (2019) | Cultura organizacional orientada a los datos | | Disponibilidad y calidad de datos para alimentar modelos predictivos | B (condiciones de gestión de costos) |
| 3 | Czarnecki & Lewiński (2021) | Uso de modelos como XGBoost en estimación conceptual | | Alta precisión en fases iniciales con información limitada | C (beneficios y precisión de IA) |
| 4 | Choi et al. (2015) | Interoperabilidad entre IA y plataformas BIM | | Automatización de extracción de cantidades desde modelos 3D | C (estrategias de implementación) |

| Nº | Caso (autor y año) | Lección aprendida | clave | Aplicabilidad práctica en presupuestación | Categoría metodológica relacionada |
|----|----------------------|---|-------|---|--------------------------------------|
| 5 | Liu & Ma (2015) | Formalización semántica mediante ontologías y NLP | | Estandarización de términos técnicos para mejorar interoperabilidad | B y C |
| 6 | Chen & Sheng (2022) | Simulación con red neuronal integrada a BIM | | Mejora del 20% en eficiencia operativa en la estimación | C (interoperabilidad técnica) |
| 7 | Castro et al. (2022) | Uso de IA con información limitada | | Apoyo en la toma de decisiones desde fases tempranas | C (beneficios en etapas iniciales) |
| 8 | Saparamadu (2025) | Implementación práctica en entorno real | | Agilización del proceso estimativo con alta aceptación del equipo | C (buenas prácticas y adopción real) |

Nota: Elaboración propia.

5.4 Marco de referencia con una propuesta de hoja de ruta para la implementación de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción

El presente capítulo tiene como objetivo consolidar una propuesta estructurada para la implementación de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos de construcción, a partir del análisis integral desarrollado a lo largo de la investigación. Lejos de partir de un modelo teórico desarticulado, esta propuesta se fundamenta en las condiciones actuales del sector, en los beneficios y limitaciones identificados en la práctica y en las buenas prácticas que permiten orientar una adopción más efectiva.

La integración de IA en procesos de presupuestación representa, al mismo tiempo, una oportunidad de mejora sustancial y un desafío estratégico para las organizaciones del sector construcción. Como se ha evidenciado a lo largo del estudio, esta tecnología puede contribuir significativamente a aumentar la precisión, reducir tiempos y mejorar la trazabilidad en la toma de decisiones. No obstante, su incorporación no puede abordarse de manera aislada ni improvisada, sino que requiere de una planificación progresiva que considere aspectos técnicos, operativos y culturales.

Por esta razón, el presente marco de propuesta se estructura en cinco secciones. En primer lugar, se sintetizan los factores clave que fundamentan la propuesta, agrupando los principales beneficios, limitaciones y condiciones habilitantes observadas. A partir de este sustento, se presenta una hoja de ruta para la adopción progresiva de IA en presupuestación, organizada por etapas y principios rectores. Posteriormente, se proponen estrategias operativas que abordan desde la selección de herramientas hasta la integración con sistemas existentes, seguidas por una guía práctica destinada a profesionales del sector. Finalmente, se ofrece una reflexión integradora que vincula esta propuesta con el problema de investigación y los objetivos definidos al inicio del estudio.

Este capítulo constituye, en efecto, el cierre estratégico del proceso investigativo y su mayor aporte aplicado. A través de un enfoque estructurado y fundamentado, busca no solo responder a una necesidad actual del sector, sino también, facilitar la toma de decisiones futuras en torno a la transformación digital de la gestión de costos.

5.4.1 Fundamentos de la propuesta: factores clave para la integración de IA

Antes de presentar la hoja de ruta y las estrategias operativas para la adopción de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos, resulta necesario establecer los factores que fundamentan la propuesta. Estos factores no emergen de suposiciones teóricas, sino del análisis sistemático realizado en los capítulos anteriores, donde se examinaron prácticas actuales, casos de éxito, limitaciones documentadas y condiciones contextuales del sector construcción.

En esta sección se sintetizan los beneficios comprobados, los desafíos que aún deben superarse, y las condiciones que pueden facilitar o, en su ausencia, entorpecer el proceso de integración de IA en la gestión de costos. Este marco busca ofrecer una visión integral que sustente las decisiones propuestas en los apartados siguientes y que permita comprender con mayor claridad el porqué de cada lineamiento incluido en la propuesta.

5.4.1.1 Beneficios comprobables de la IA en presupuestación

Se han identificado una serie de beneficios concretos derivados del uso de inteligencia artificial en procesos de presupuestación dentro del sector construcción. Estos beneficios no solo han sido reconocidos en la literatura especializada, sino que también han sido validados en los

casos de estudio analizados, lo que permite establecer una base sólida para su integración en entornos reales.

Uno de los principales aportes de la IA en presupuestación es la mejora en la precisión de las estimaciones. Se ha demostrado que el uso de algoritmos predictivos como XGBoost o modelos entrenados sobre bases de datos históricas permite reducir los márgenes de error, especialmente en fases conceptuales donde la información disponible suele ser limitada. Este hallazgo es particularmente relevante en proyectos con alta incertidumbre, donde la capacidad de anticipar desviaciones presupuestarias marca una diferencia significativa en la toma de decisiones.

Otro beneficio recurrente es la automatización de tareas repetitivas y operativas, como la cuantificación de materiales o la extracción de cantidades desde modelos BIM. El caso, por ejemplo, centrado en la estimación automatizada de acero en vigas de concreto, ejemplifica cómo la IA simbólica puede disminuir el tiempo de trabajo manual y minimizar errores humanos asociados a procesos de entrada de datos. Esta automatización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que libera recursos técnicos que pueden ser destinados a actividades de mayor valor estratégico.

Asimismo, se ha evidenciado una mejora sustancial en los tiempos de respuesta, especialmente en fases tempranas del proyecto. Se visualizó reducciones considerables en los tiempos necesarios para generar estimaciones iniciales, lo que permite repetir propuestas con mayor agilidad y responder de forma más dinámica a cambios del cliente o del mercado. Esta rapidez se traduce en una ventaja competitiva en entornos donde el tiempo de entrega influye directamente en la adjudicación de contratos.

Por otro lado, la integración de IA en procesos de presupuestación ha promovido una mayor consistencia y trazabilidad en los datos. La posibilidad de estructurar y analizar grandes volúmenes de información bajo criterios uniformes contribuye a una mejor trazabilidad de las decisiones presupuestarias y facilita la retroalimentación para futuros proyectos.

En síntesis, los beneficios comprobados de la inteligencia artificial en la presupuestación no se limitan a una sola dimensión técnica, sino que abarcan mejoras en precisión, eficiencia, tiempos de respuesta y calidad de la información. Estos resultados permiten sustentar la viabilidad de su adopción en el sector construcción, siempre que se cuente con condiciones adecuadas para su implementación progresiva.

5.4.1.2 Limitaciones y desafíos actuales

Si bien la inteligencia artificial ha mostrado un amplio potencial en la presupuestación de proyectos, su adopción enfrenta múltiples limitaciones que deben ser abordadas con realismo y estrategia. Estas barreras, no solo son de tipo tecnológico, sino también organizacional, operativo y cultural.

Uno de los principales desafíos identificados es la disponibilidad limitada de datos estructurados y de calidad. Los modelos de IA requieren bases de datos históricas consistentes, actualizadas y contextualizadas para generar resultados confiables. Sin embargo, en muchas empresas del sector, la información relevante para la presupuestación se encuentra dispersa, incompleta o almacenada en formatos no estructurados, lo que dificulta su uso directo por parte de los algoritmos.

Otro obstáculo relevante es la baja interoperabilidad entre herramientas digitales, particularmente entre los sistemas tradicionales de presupuestación y plataformas emergentes como BIM, ERP o soluciones de IA. Si bien es técnicamente posible integrar IA a modelos BIM, dicha integración requiere adaptaciones técnicas y semánticas que muchas empresas aún no están preparadas para ejecutar sin apoyo externo. Esto genera cuellos de botella y retrasa la adopción a gran escala.

En términos organizacionales, se evidencian resistencias internas al cambio, especialmente en empresas donde la toma de decisiones presupuestarias se ha realizado históricamente a través de métodos manuales o con herramientas tradicionales. Esto se ilustra cuando incluso con una herramienta que demuestra ser efectiva, su adopción puede verse limitada si no existe un acompañamiento claro desde la dirección o si los equipos técnicos no están debidamente capacitados para confiar en los resultados generados por la IA.

También se ha identificado una falta de criterios estandarizados para evaluar el desempeño de las soluciones de IA; distintas métricas pueden arrojar interpretaciones divergentes sobre la efectividad de un modelo, lo cual puede generar desconfianza y frenar su implementación. Sin indicadores claros y contextualizados, es difícil justificar inversiones o tomar decisiones informadas sobre la continuidad o ajuste de la herramienta.

Finalmente, otro desafío transversal es la falta de marcos normativos claros que regulen el uso de inteligencia artificial en procesos sensibles como la estimación de costos. Esta

incertidumbre legal y técnica obliga a las empresas a asumir el riesgo de implementación sin contar con estándares definidos que respalden su uso en procesos contractuales o licitaciones públicas.

En conjunto, estas limitaciones no representan una imposibilidad, sino una llamada de atención sobre los aspectos que deben ser considerados cuidadosamente al diseñar cualquier estrategia de adopción de IA en la presupuestación. Su reconocimiento explícito es, precisamente, lo que permite construir una propuesta realista, adaptada al contexto del sector y orientada al éxito a largo plazo.

5.4.1.3 Factores habilitantes identificados

Así como se han identificado múltiples limitaciones en la adopción de inteligencia artificial para la presupuestación, también han surgido condiciones que, cuando están presentes, actúan como catalizadores para una implementación exitosa. Estos factores habilitantes no garantizan por sí mismos el éxito, pero sí crean un entorno más favorable para que la tecnología se integre de manera efectiva, sostenible y alineada con los objetivos del proyecto y de la organización.

Uno de los elementos más consistentes es la existencia de una cultura organizacional orientada a los datos. Se ha demostrado que las organizaciones que promueven la recolección sistemática de datos, su almacenamiento ordenado y su análisis constante, están mejor preparadas para implementar soluciones de IA. Esta cultura facilita no solo la disponibilidad de insumos de calidad para entrenar modelos, sino también la aceptación de los resultados como insumos válidos para la toma de decisiones.

Otro factor habilitante relevante es la interoperabilidad entre sistemas y plataformas digitales. La integración de modelos de IA con entornos BIM para la estimación de costos, demuestran que cuando las plataformas pueden intercambiar información sin fricciones, la eficiencia del proceso presupuestario mejora considerablemente. Esta interoperabilidad permite automatizar procesos, reducir la duplicidad de tareas y mantener la trazabilidad de los datos en todo el ciclo de vida del proyecto.

Asimismo, se ha identificado como facilitador la adopción progresiva y modular de la tecnología, especialmente cuando esta se implementa inicialmente en áreas específicas o proyectos piloto. Ha quedado en evidencia que empezar con aplicaciones controladas, como, por ejemplo, como modelos de estimación conceptual en etapas tempranas, permite ajustar parámetros,

capacitar al equipo e identificar resistencias antes de escalar la solución. Esta estrategia reduce riesgos y mejora la aceptación de la tecnología a nivel organizacional.

La colaboración entre perfiles técnicos y analíticos también figura como una condición clave. Por tanto, la adopción de IA no puede quedar únicamente en manos del área tecnológica, sino que debe ser producto del trabajo conjunto entre especialistas en presupuestación, ingenieros, arquitectos y profesionales en ciencia de datos. Este enfoque interdisciplinario, además de facilitar la configuración técnica de los modelos, asegura que las herramientas respondan a las necesidades reales del proyecto.

Por último, se reconoce como habilitador el apoyo institucional y directivo; la validación operativa de una herramienta no es suficiente si no va acompañada de una visión estratégica clara desde la dirección, con políticas que respalden su implementación, asignación de recursos y seguimiento sistemático. El liderazgo activo permite superar barreras internas y consolidar la transformación de procesos de manera sostenible.

En conjunto, estos factores habilitantes configuran el terreno sobre el cual puede construirse una adopción de IA sólida en la presupuestación. Identificarlos de forma anticipada permite no solo evaluar la viabilidad de la implementación, sino también diseñar acciones específicas para fortalecerlos y asegurar una integración exitosa en el contexto particular de cada organización.

5.4.2 Propuesta de hoja de ruta para la adopción de IA en presupuestación

A partir del análisis realizado y de los factores clave identificados en la sección anterior, se propone a continuación una hoja de ruta estructurada para guiar la adopción progresiva de inteligencia artificial en procesos de presupuestación de proyectos de construcción. Esta propuesta no parte de una única experiencia ni responde a un modelo genérico, sino que sintetiza patrones observados en casos de éxito, limitaciones detectadas en la práctica y condiciones reales del sector.

El objetivo de esta hoja de ruta es ofrecer una secuencia lógica, adaptable y replicable, que permita a las organizaciones avanzar desde una etapa exploratoria hasta una integración plena de soluciones basadas en IA. Para lograrlo, se parte de un conjunto de principios rectores que orientan el proceso, se describen las etapas sugeridas y se analizan los factores críticos que influyen en cada fase del recorrido.

5.4.2.1 Principios rectores de la adopción

Toda estrategia de transformación tecnológica requiere estar guiada por principios que aseguren su coherencia, sostenibilidad y alineación con los objetivos organizacionales. En el caso de la adopción de inteligencia artificial en presupuestación, los casos analizados y la revisión teórica permiten identificar una serie de principios rectores que deben acompañar el proceso desde sus primeras fases.

El primer principio es la progresividad, entendida como la necesidad de avanzar en etapas graduales, sin imponer cambios abruptos ni soluciones generalizadas que desconozcan la realidad operativa de la empresa. Por tanto, iniciar con aplicaciones puntuales o en proyectos piloto permite reducir el riesgo de rechazo interno, ajustar los modelos a partir de la experiencia y construir confianza progresivamente.

En segundo lugar, se destaca el principio de contextualización, que implica adaptar las herramientas de IA a las condiciones específicas de cada organización: sus bases de datos, normativas locales, estructura operativa y procesos internos. Estos factores no pueden ser ignorados, ya que pueden limitar significativamente el desempeño de los modelos y generar resultados poco confiables.

El tercer principio rector es la interoperabilidad, clave para asegurar que la IA pueda integrarse sin fricciones a los sistemas ya existentes. Cuando la IA se conecta de forma efectiva con plataformas como BIM o ERP, se incrementa su utilidad y se reducen los esfuerzos redundantes, lo cual potencia la eficiencia del flujo de trabajo.

Otro principio fundamental es la orientación a resultados concretos, lo cual significa que cada fase del proceso debe estar asociada a indicadores verificables que permitan evaluar su impacto, ajustar la estrategia y justificar la inversión realizada. Como resultado, medir la precisión, la reducción de tiempos o la confiabilidad de los datos es esencial para generar valor tangible desde la implementación de la IA.

Por último, la adopción debe regirse por el principio de participación interdisciplinaria, fomentando la colaboración entre perfiles técnicos, analíticos y operativos. La construcción de soluciones de IA no puede quedar únicamente en manos del área tecnológica, sino que debe involucrar a quienes conocen los procesos de presupuestación desde la experiencia práctica. Esto, además de mejorar la alineación entre necesidades y soluciones, incrementa el sentido de apropiación por parte del equipo y fortalece la sostenibilidad del cambio.

Estos cinco principios constituyen la base sobre la cual se estructura la hoja de ruta propuesta. No son reglas rígidas, sino lineamientos orientadores que pueden adaptarse a distintas realidades, pero que en todos los casos contribuyen a una implementación más efectiva y coherente de la inteligencia artificial en la gestión de costos.

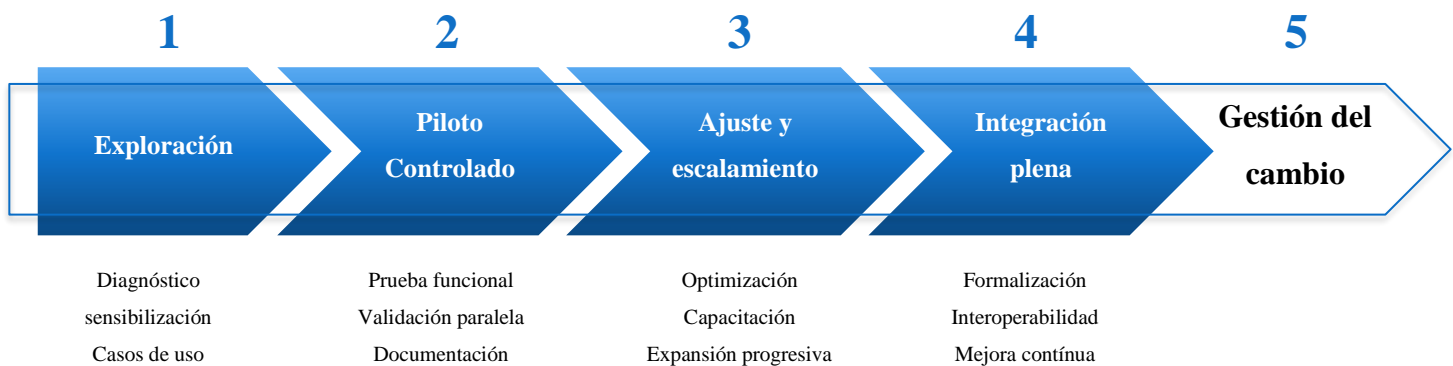
5.4.2.2 Etapas de adopción progresiva

La adopción de inteligencia artificial en presupuestación requiere un enfoque progresivo que permita avanzar con claridad, mitigando riesgos y facilitando el aprendizaje organizacional en cada fase. Con base en los hallazgos de esta investigación, se proponen cuatro etapas que orientan este proceso de manera estructurada y adaptable: exploración, piloto controlado, ajuste y escalamiento, e integración plena.

Cada etapa responde a objetivos específicos y contempla acciones concretas que serán desarrolladas en los siguientes apartados. Si bien se presentan de forma secuencial, pueden ser ajustadas a las particularidades de cada organización, permitiendo una implementación flexible, gradual y sostenible, y esto se puede observar en la Figura 5.1.

Además de las etapas secuenciales descritas, se incorpora una fase transversal denominada Gestión de la cultura organizacional, la cual acompaña y refuerza todas las fases del proceso de adopción de IA. Esta fase busca garantizar la alineación cultural, la aceptación del cambio y la sostenibilidad de la transformación tecnológica dentro de las organizaciones del sector construcción.

Figura 5.1. Diagrama de ruta por etapas.



Nota: Elaboración propia.

1. Exploración

La fase de exploración representa el punto de partida para cualquier proceso serio de adopción de inteligencia artificial en presupuestación. Su objetivo principal es generar una comprensión clara del estado actual de la organización en relación con sus procesos presupuestarios, sus capacidades tecnológicas, la disponibilidad y calidad de datos, y la apertura del equipo hacia la incorporación de nuevas herramientas.

Uno de los pasos fundamentales en esta etapa es la realización de un diagnóstico interno, que permita identificar fortalezas, brechas y oportunidades específicas. Tal diagnóstico puede incluir desde una revisión de los formatos actuales de presupuestación y las bases de datos existentes, hasta entrevistas breves con usuarios clave para conocer percepciones, resistencias culturales y necesidades. Este paso es crucial para evitar implementar soluciones desconectadas de la realidad operativa de la empresa.

Al mismo tiempo, es recomendable desarrollar acciones de sensibilización y alfabetización digital dirigidas al equipo técnico y a los usuarios clave. Estas acciones no tienen por qué ser complejas; pueden incluir sesiones introductorias sobre qué es la IA, cómo funciona en el contexto de la construcción, y qué beneficios y desafíos representa para el trabajo diario. Además de transmitir conocimientos básicos, estas actividades deben abrir espacios de diálogo que permitan abordar los temores más frecuentes (como la sustitución laboral, la pérdida de autonomía o la confiabilidad de los resultados generados por IA). De este modo, la sensibilización se convierte también en una estrategia de gestión temprana de resistencias culturales, fortaleciendo la confianza y la disposición del personal para participar activamente en el proceso.

Otro elemento clave de esta etapa es la identificación de casos de uso potenciales, es decir, procesos dentro del área de presupuestación que podrían beneficiarse del uso de IA. Esto permite comenzar a visualizar en qué parte del flujo de trabajo tendría más impacto una intervención tecnológica y cómo podría medirse ese impacto posteriormente.

Es importante que esta fase concluya con un compromiso inicial por parte de la dirección para continuar el proceso, asignando al menos un equipo de trabajo base y recursos mínimos para avanzar hacia una implementación piloto. Este respaldo institucional será necesario para que las siguientes fases puedan ejecutarse con legitimidad y continuidad.

En esta etapa se promueve el involucramiento temprano de los usuarios clave mediante entrevistas y sesiones introductorias, así como el fomento de una cultura orientada a datos, a través

de actividades de sensibilización digital. El reconocimiento abierto de las resistencias culturales y la implementación de mecanismos para gestionarlas de manera participativa constituyen condiciones críticas para asegurar la legitimidad de este avance.

A continuación, se presenta en el Cuadro 5.7. los principales aspectos a considerar en esta etapa:

Cuadro 5.7. Resumen de los aspectos clave de la etapa de exploración.

| Elemento | Descripción |
|-------------------------------|---|
| Objetivo principal | Diagnosticar el estado actual, sensibilizar a la organización y gestionar resistencias culturales tempranas |
| Acciones clave | Evaluación interna, entrevistas y sesiones introductorias, mapeo de casos de uso, espacios de diálogo para abordar resistencias |
| Condiciones necesarias | Disponibilidad de tiempo del equipo técnico, apertura al cambio, respaldo inicial de la alta dirección, reconocimiento de inquietudes culturales y gestión activa de resistencias |
| Resultados esperados | Informe de diagnóstico, personal sensibilizado, identificación de procesos clave, compromiso institucional de continuar, lineamientos y ajustes previos para un piloto controlado, confianza inicial del equipo en el proceso |

Nota: Elaboración propia.

Finalmente, la información generada en esta fase, incluyendo el diagnóstico institucional, la priorización de procesos y la medición del grado de apertura al cambio, se constituye en el insumo esencial para decidir cómo y en qué condiciones avanzar hacia un piloto controlado. Esto significa que el paso a la siguiente etapa no se da de manera automática, sino que depende de las evidencias obtenidas y de los aprendizajes generados. En este punto, resulta indispensable que la alta dirección respalde explícitamente la continuidad del proceso, asignando los recursos mínimos y validando los ajustes necesarios que se deriven del diagnóstico.

En síntesis, la fase de exploración no se limita a un análisis técnico, sino que incorpora activamente la gestión de resistencias culturales como un eje transversal. Este enfoque cultural temprano garantiza que los aprendizajes y percepciones del personal se conviertan en insumos estratégicos para orientar las siguientes fases, fortaleciendo así la legitimidad y sostenibilidad del proceso de adopción de inteligencia artificial.

2. Piloto controlado

Una vez concluida la etapa de exploración, y con base en el diagnóstico institucional, la priorización de procesos y la medición del grado de apertura al cambio, el siguiente paso consiste en implementar una solución puntual de inteligencia artificial en un entorno acotado y de bajo riesgo. Este tránsito no es automático: depende de las evidencias obtenidas y de las recomendaciones derivadas de la fase anterior.

La finalidad central del piloto es validar en condiciones reales si la solución de IA seleccionada contribuye efectivamente a mejorar aspectos clave del proceso presupuestario, tales como la precisión de las estimaciones, la reducción de tiempos o la automatización de tareas operativas. Para ello, resulta indispensable seleccionar un caso de aplicación que sea representativo pero controlable, como puede ser la estimación de costos en una fase conceptual de proyecto o la automatización de la cuantificación de un rubro específico.

Durante esta fase, se mantiene una validación paralela entre la herramienta de IA y los métodos tradicionales, lo que permite generar métricas comparables y construir confianza en los equipos. En este punto, resulta esencial asegurar la calidad y disponibilidad de los datos utilizados, ya que un conjunto de información insuficiente o inconsistente puede limitar los resultados del piloto.

Al mismo tiempo, la gestión cultural adquiere un rol prioritario: es necesario acompañar al personal en el proceso de adaptación, atender posibles resistencias y reforzar los espacios de sensibilización iniciados en la etapa exploratoria. Factores críticos como la formación continua del equipo y la apertura al aprendizaje colectivo se convierten en condiciones indispensables para mitigar barreras comunes, tales como la resistencia al cambio o la falta de estandarización en los procesos internos.

Asimismo, el piloto requiere el respaldo explícito de la alta dirección, tanto en la asignación de recursos mínimos como en la validación de los ajustes derivados del diagnóstico. Este compromiso otorga legitimidad al proceso, evita que el piloto se perciba como un ejercicio aislado y asegura que los aprendizajes se traduzcan en decisiones estratégicas. La implicación del liderazgo es, además, un mecanismo para superar obstáculos como la ausencia de criterios claros para evaluar el desempeño de la herramienta o la percepción de que se trata de un proyecto puramente técnico.

Otro aspecto crítico es la gestión de expectativas. El equipo debe comprender que el piloto constituye un espacio de aprendizaje controlado y que los errores o resultados inesperados no representan fracasos, sino oportunidades de ajuste antes de un escalamiento mayor. La documentación detallada del proceso —incluyendo datos utilizados, configuración técnica, dificultades surgidas y experiencias de uso por parte del equipo— será clave para retroalimentar fases posteriores. En este sentido, la interoperabilidad tecnológica con sistemas ya existentes (como BIM, ERP o herramientas de control de costos) es un facilitador clave, pues permite integrar la IA en los flujos de trabajo habituales y aumentar su aceptación.

Finalmente, esta etapa debe cerrarse con un informe de resultados del piloto que contenga evidencias cuantitativas y cualitativas, junto con recomendaciones para su ajuste o ampliación. Dicho informe será la base para decidir si la solución es escalable y en qué condiciones conviene avanzar hacia la siguiente fase del proceso.

El Cuadro 5.8. presenta los principales aspectos a considerarse en esta etapa:

Cuadro 5.8. Resumen de los aspectos clave de la etapa de piloto controlado.

| Elemento | Descripción |
|-------------------------------|--|
| Objetivo principal | Validar el desempeño de una solución de IA en un entorno controlado y con base en el diagnóstico previo |
| Acciones clave | Selección de caso, configuración técnica, validación paralela, seguimiento, gestión cultural y acompañamiento en la adaptación |
| Condiciones necesarias | Disponibilidad de datos, equipo técnico de soporte, apertura a iteración, respaldo explícito de la alta dirección |
| Resultados esperados | Informe de resultados, métricas comparadas, lecciones aprendidas, criterios de escalabilidad definidos |

Nota: Elaboración propia.

En síntesis, la fase de piloto controlado permite transformar los hallazgos de la exploración en resultados concretos y medibles, al tiempo que fortalece la confianza institucional en el uso de la IA. Los aprendizajes, tanto técnicos como culturales, se convierten en la base para determinar si la solución puede ser ajustada y posteriormente escalada. Con ello, se garantiza que el avance

hacia la siguiente fase no solo esté sustentado en evidencia técnica, sino también en un proceso de cambio cultural gestionado y legitimado por toda la organización.

3. Ajuste y escalamiento

Una vez validado el uso de la inteligencia artificial en un entorno controlado, la siguiente etapa consiste en ajustar la solución en función de los aprendizajes obtenidos y comenzar a escalar su aplicación a otros proyectos, funciones o equipos dentro de la organización. Esta fase es crucial para pasar de una iniciativa aislada a un proceso progresivamente institucionalizado.

El primer paso consiste en realizar una evaluación crítica del piloto, identificando tanto los aciertos como las oportunidades de mejora. Esto incluye revisar los modelos utilizados, los datos requeridos, los puntos de fricción operativa y la experiencia de los usuarios. De manera transversal, se debe analizar también la aceptación cultural y los niveles de resistencia encontrados, con el fin de diseñar estrategias de acompañamiento específicas que reduzcan temores, refuercen la confianza y favorezcan la adopción. Esta etapa de ajuste es indispensable para garantizar que la solución mantenga su efectividad al aplicarse en contextos más diversos y, al mismo tiempo, que la gestión cultural acompañe de manera activa el proceso de ampliación.

A continuación, se debe escalar el uso de la herramienta de forma planificada y controlada. Esto puede implicar su aplicación en nuevos proyectos, su extensión a otros procesos presupuestarios o su utilización por parte de distintos equipos. En todos los casos, se recomienda mantener un enfoque progresivo, evaluando el impacto en cada nueva instancia antes de pasar a la siguiente. En este punto, la comunicación clara de beneficios, el involucramiento temprano de los equipos y la visibilización de casos de éxito resultan determinantes para disminuir resistencias culturales y generar legitimidad organizacional. Aquí, el rol de la alta dirección es clave, pues debe legitimar la expansión de la herramienta, asignar los recursos necesarios y mantener la coherencia estratégica para evitar esfuerzos dispersos.

En esta etapa, cobra especial importancia la formación continua del equipo humano, ya que el aumento en el alcance de la herramienta requerirá que más personas la utilicen, comprendan su lógica de funcionamiento y confíen en sus resultados. El diseño de capacitaciones con enfoque práctico y la creación de embajadores del cambio son recursos que ayudan a transformar posibles focos de resistencia en promotores internos de la innovación. Además, es conveniente establecer

espacios de retroalimentación donde los usuarios puedan reportar hallazgos, dificultades o mejoras sugeridas, lo cual contribuye a fortalecer la cultura de innovación y de apertura al cambio.

Otro componente estratégico de esta fase es la integración progresiva con otras plataformas existentes, como BIM, ERP o bases de datos históricas. Esta interoperabilidad permite automatizar tareas, reducir redundancias y aumentar el valor agregado de la IA, especialmente cuando se vincula a modelos tridimensionales o sistemas de gestión integrados.

Finalmente, esta fase debe incluir la definición de indicadores de desempeño claros, que permitan monitorear el impacto de la IA en los procesos de presupuestación y justificar su continuidad o expansión futura. Estos indicadores pueden incluir métricas como precisión estimativa, tiempo de elaboración de presupuestos, reducción de errores manuales o nivel de adopción por parte del equipo. En particular, el seguimiento debe contemplar también indicadores de aceptación cultural, tales como la participación en espacios de retroalimentación o la percepción de confianza en los resultados generados por la IA.

En síntesis, la fase de ajuste y escalamiento busca consolidar la aplicación de la inteligencia artificial dentro de la organización mediante una estrategia gradual, culturalmente consciente y avalada por la alta dirección. Así, la ruta contempla la adopción modular y progresiva de la herramienta, fortalecida por la capacitación continua, la retroalimentación de los usuarios y la integración tecnológica, como se resume en el Cuadro 5.9.

Cuadro 5.9. Resumen de los aspectos clave de la etapa de ajuste y escalamiento.

| Elemento | Descripción |
|-------------------------------|---|
| Objetivo principal | Optimizar la herramienta y ampliar su uso en distintos contextos, asegurando su legitimidad cultural |
| Acciones clave | Revisión crítica del piloto, formación continua, integración con otros sistemas, espacios de retroalimentación, gestión de resistencia cultural |
| Condiciones necesarias | Compromiso directivo, recursos técnicos, estrategia de capacitación, acompañamiento al cambio cultural |
| Resultados esperados | Mejora continua, ampliación del alcance, indicadores de desempeño definidos, confianza organizacional reforzada |

Nota: Elaboración propia.

De esta forma, la fase de ajuste y escalamiento no solo permite perfeccionar la herramienta y ampliar su aplicación de manera progresiva, sino que también consolida aprendizajes organizacionales que reducen la resistencia cultural, fortalecen la confianza en la IA y preparan a la organización para la adopción plena. Con estos avances, la organización se encuentra en condiciones de dar el paso hacia la consolidación e institucionalización de la IA en sus procesos de presupuestación, garantizando que su adopción no sea percibida como una iniciativa aislada, sino como parte integral de la estrategia corporativa de gestión de costos y transformación digital.

4. Integración plena

La etapa de integración plena representa el punto de consolidación del proceso de adopción de inteligencia artificial en presupuestación. En esta fase, la tecnología deja de percibirse como una solución experimental o complementaria, para convertirse en un componente estratégico del sistema de gestión de costos, plenamente alineado con los procesos operativos y los objetivos organizacionales de largo plazo.

Uno de los elementos clave de esta fase es la formalización institucional del uso de IA, lo cual implica establecer políticas internas, protocolos operativos y responsabilidades claras para su gestión. Esta institucionalización genera estabilidad en el uso de la herramienta, evita la dependencia de personas clave y facilita su incorporación en nuevos proyectos sin necesidad de rediseños constantes.

Asimismo, se espera que exista una integración total con otras plataformas y sistemas internos, tales como BIM, ERP, bases de datos históricas y herramientas de control de costos. Esta interoperabilidad no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también consolida una cadena de valor digital, en la que los datos fluyen de forma continua desde el diseño hasta la ejecución.

Otro aspecto central es la medición continua del desempeño del sistema de IA, mediante indicadores previamente definidos. Estos pueden incluir métricas técnicas (precisión de estimaciones, reducción de tiempos) y de adopción organizacional (usuarios activos, frecuencia de uso, satisfacción del equipo). La información generada por estos indicadores permite realizar ajustes, justificar decisiones y demostrar el valor agregado de la solución implementada.

Además, resulta indispensable establecer un esquema de mejora continua, que contemple la retroalimentación del equipo técnico, la actualización periódica de los modelos y la revisión de

la calidad de los datos. La inteligencia artificial no es una solución estática, y su efectividad a largo plazo dependerá de la capacidad de la organización para evolucionar junto con ella.

Un elemento adicional que considerar en esta etapa es el alineamiento con los marcos normativos y regulatorios vigentes. En aquellos casos donde no existan referentes legales específicos para el uso de IA en presupuestación, la organización deberá definir políticas internas claras, estándares técnicos y protocolos de control que garanticen transparencia, trazabilidad y responsabilidad en el uso de los resultados. Este alineamiento no solo contribuye a mitigar riesgos legales y éticos, sino que también fortalece la legitimidad institucional y la confianza de los distintos actores involucrados.

Un aspecto crítico en esta fase es la consolidación cultural del cambio. Aunque las resistencias iniciales suelen disminuir, resulta necesario reforzar continuamente una cultura organizacional orientada a la innovación y al uso de datos. Para ello, se implementan programas de reconocimiento a las buenas prácticas, espacios de aprendizaje colectivo y mecanismos de comunicación que refuercen la confianza en la herramienta. La gestión del cambio cultural en este nivel ya no se limita a reducir temores, sino a garantizar que la aceptación de la IA se traduzca en compromiso sostenido, evitando retrocesos y asegurando que la solución se perciba como un recurso propio y valioso para toda la organización.

Cuadro 5.10. Resumen de los aspectos clave de la etapa de integración plena.

| Elemento | Descripción |
|-------------------------------|---|
| Objetivo principal | Incorporar la IA como parte estructural del sistema de gestión de costos |
| Acciones clave | Formalización institucional, interoperabilidad total, medición continua |
| Condiciones necesarias | Liderazgo estratégico, madurez digital, procesos estandarizados, gestión cultural sostenida |
| Resultados esperados | Uso consolidado, mejora sostenida, toma de decisiones basada en datos |

Nota: Elaboración propia.

En síntesis, la integración plena representa la madurez máxima del proceso de adopción de la inteligencia artificial en presupuestación, al consolidarla como un componente estructural dentro de la estrategia organizacional. Este nivel de institucionalización, junto con la consolidación cultural, sienta las bases para garantizar la sostenibilidad, adaptabilidad y competitividad de la

empresa en el largo plazo, permitiendo que la IA evolucione como un recurso indispensable para la toma de decisiones estratégicas y la optimización continua de los costos.

5. Gestión de la cultura organizacional

La gestión de la cultura organizacional constituye un componente esencial para el éxito de la adopción de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción. A diferencia de las etapas secuenciales de la hoja de ruta, esta fase se desarrolla de forma transversal, acompañando a cada una de ellas con estrategias orientadas a fortalecer la disposición al cambio, la comunicación efectiva y el compromiso del talento humano.

El objetivo principal de esta fase es consolidar una cultura organizacional que favorezca la innovación, la confianza en la tecnología y el aprendizaje continuo. Para ello, se recomienda implementar acciones tales como:

- **Sensibilización y comunicación interna:** diseñar campañas que expliquen los beneficios y alcances del uso de IA, evitando percepciones de reemplazo laboral y fomentando la visión de coevolución entre persona y tecnología.
- **Capacitación y fortalecimiento de competencias:** establecer programas progresivos de formación técnica y de gestión del cambio para los distintos niveles de la organización.
- **Liderazgo y gestión del cambio:** promover líderes internos que actúen como agentes de transformación, impulsando la adopción desde el ejemplo y la colaboración.
- **Reconocimiento y motivación:** establecer mecanismos de reconocimiento para equipos o personas que impulsen la mejora continua y la integración responsable de la IA.
- **Evaluación cultural continua:** aplicar instrumentos periódicos de diagnóstico organizacional para medir la percepción del personal y ajustar las estrategias de comunicación y capacitación.

Esta fase debe entenderse como una línea transversal de gestión que refuerza los pilares humanos y organizacionales en cada etapa de la hoja de ruta, asegurando que la transformación digital no se limite al componente tecnológico, sino que se extienda al cambio cultural requerido para su sostenibilidad en el tiempo.

5.4.3 Estrategias operativas para una implementación efectiva

Una vez definida la hoja de ruta y comprendidos los factores que condicionan su éxito, es necesario aterrizar el proceso en un conjunto de estrategias operativas que faciliten su implementación en entornos reales. Estas estrategias constituyen la traducción práctica de las fases previamente planteadas, funcionando como puentes entre el diseño conceptual de la adopción y su ejecución concreta dentro de los flujos de trabajo de la organización. Si bien cada empresa deberá adaptar estas recomendaciones a su contexto particular, los casos analizados y la literatura especializada permiten identificar acciones clave que aumentan significativamente la probabilidad de éxito.

5.4.3.1 Selección de herramientas de IA adecuadas para la presupuestación

El primer paso operativo consiste en seleccionar herramientas de IA alineadas con las necesidades, capacidades y objetivos de la organización. Esto implica evaluar si se requiere un modelo predictivo, una herramienta de automatización o una solución basada en aprendizaje automático. Ha quedado evidenciado que herramientas simples y bien contextualizadas pueden tener un impacto mayor que soluciones sofisticadas, pero mal implementadas.

Además, es fundamental analizar el nivel de madurez digital de la empresa, la calidad de sus datos históricos y la interoperabilidad deseada con sistemas como BIM o ERP. Esta selección debe hacerse desde un enfoque técnico y estratégico, con participación tanto del área de presupuestos como de tecnología, para asegurar que la solución tenga viabilidad real.

5.4.3.2 Capacitación del equipo y gestión del cambio

Toda transformación tecnológica requiere un acompañamiento humano. La implementación de IA en presupuestación implica una gestión activa del cambio organizacional, orientada no solo a enseñar nuevas herramientas, sino también a transformar actitudes, rutinas y formas de interpretar la información.

El éxito de la IA depende en gran medida de la confianza que los usuarios depositan en la herramienta. Para lograrlo, es necesario diseñar planes de capacitación progresiva, incluir sesiones prácticas, construir espacios de retroalimentación y generar instancias donde las personas puedan expresar sus inquietudes o resistencias sin juicio.

5.4.3.3 Integración con plataformas existentes

Una de las recomendaciones más reiteradas en los casos exitosos es integrar la IA dentro del ecosistema digital ya existente, en lugar de implementarla como una solución paralela o desconectada. La interoperabilidad con herramientas como BIM, ERP o bases de datos de control de costos permite aprovechar al máximo el potencial de la IA y facilita su uso cotidiano.

La integración con modelos tridimensionales BIM permitió automatizar la extracción de cantidades y mejorar la precisión en la estimación. Esta integración técnica, sin embargo, debe ser acompañada por una estandarización de formatos, protocolos de comunicación y definiciones semánticas claras.

5.4.3.4 Evaluación y mejora continua del sistema de IA

Finalmente, toda solución de IA debe incluir desde el inicio una estrategia de monitoreo y mejora continua. Esto significa establecer indicadores de desempeño claros, como precisión estimativa, tiempos de ejecución, nivel de adopción y confianza de los usuarios en el sistema. Además, es recomendable medir periódicamente la reducción de errores, la eficiencia lograda en los flujos de trabajo y el grado de satisfacción del equipo.

Los modelos de IA no son estáticos, y su rendimiento puede mejorar con ajustes, nuevas fuentes de datos o refinamientos técnicos. Por ello, las organizaciones deben pensar en sus soluciones de IA no como productos terminados, sino como sistemas en evolución que requieren atención, análisis y retroalimentación constante.

En síntesis, estas estrategias operativas no solo habilitan la adopción técnica de la IA, sino que también construyen las condiciones organizacionales necesarias para que la guía práctica, presentada en el siguiente apartado, pueda ser aplicada con efectividad.

5.4.4 Guía práctica para profesionales del sector

Con base en la propuesta desarrollada a lo largo de este capítulo, se presenta a continuación una guía práctica dirigida a profesionales del sector construcción interesados en adoptar inteligencia artificial en procesos de presupuestación. Esta herramienta condensa los pasos clave de la hoja de ruta, junto con recomendaciones estratégicas y elementos críticos a considerar en cada fase.

La guía práctica presentada no constituye un recetario genérico; es la traducción operativa de la hoja de ruta propuesta, enriquecida con la triangulación de evidencia empírica (entrevistas, encuestas y casos) y con las condiciones observadas en el sector construcción costarricense. Su propósito es operacionalizar la adopción de IA en presupuestación mediante: (i) criterios de selección de casos de uso acordes al nivel de madurez digital, (ii) una matriz de responsabilidades por fase (dirección, presupuestos, TI, RR. HH.), (iii) indicadores cuantitativos técnicos y culturales para seguimiento, y (iv) plantillas de apoyo (diagnóstico, plan de capacitación, control de cambios y lecciones aprendidas). La guía se adapta a organizaciones con distinta capacidad, evitando implantar soluciones descontextualizadas.

A diferencia de esquemas genéricos de adopción tecnológica, esta guía incorpora cuatro aportes distintivos: (1) Gestión cultural integrada por fase, con métricas específicas (apertura, participación, confianza, satisfacción) y acciones concretas (sensibilización, embajadores del cambio, comunicación estratégica). (2) Indicadores operativos verificables en cada etapa (precisión vs. método tradicional, reducción de tiempos, % de usuarios certificados, interoperabilidad efectiva, MAU, NPS interno), superando el enfoque de “entregables” como pseudoindicadores. (3) Interoperabilidad pragmática y progresiva con BIM/ERP y bases históricas, con estandarización mínima viable (formatos, semántica, protocolos) para asegurar trazabilidad y evitar islas tecnológicas. (4) Diseño de piloto con umbrales de escalamiento (desviación $\leq \pm 5\%$, mejoras de tiempo, requisitos de datos) y condiciones de decisión para escalar o iterar, reduciendo riesgos de adopción simbólica.

El Cuadro 5.11. puede utilizarse como *checklist* o instrumento de planificación, adaptándose a las características de cada organización. Si bien cada caso requerirá ajustes específicos, esta guía ofrece un marco de acción claro, progresivo y alineado con los hallazgos obtenidos a lo largo de la investigación.

Cuadro 5.11. Instrumento de planificación según etapa de implementación de IA.

| Etapa | Acción clave | Responsable sugerido | Indicador de éxito |
|-------------|---|-----------------------------|--|
| Exploración | Diagnóstico interno sobre procesos y cultura de datos | Coordinador de presupuestos | % de procesos de presupuestación mapeados en el diagnóstico ($\geq 90\%$) y puntaje de apertura al cambio (encuesta Likert, media $\geq 3.5/5$) |

| Etapa | Acción clave | Responsable sugerido | Indicador de éxito |
|-----------------------|--|--|---|
| Exploración | Sensibilización del equipo técnico | Recursos Humanos / TI | Tasa de asistencia efectiva a sesiones ($\geq 80\%$ convocados) y mejora de conocimiento pre-post (≥ 20 p.p.) |
| | Identificación de casos de uso potenciales | Jefatura técnica | Ajustes implementados por año (≥ 2) y uso activo mensual (MAU) sobre usuarios previstos ($\geq 80\%$) y frecuencia de uso (≥ 2 veces/semana por usuario clave) |
| | Gestión de resistencias | Recursos Humanos / Líder de implementación | Plan documentado de gestión de resistencias con ≥ 2 acciones implementadas antes del piloto |
| Piloto controlado | Selección de herramienta de IA | Equipo interdisciplinario | % de funcionalidades clave operativas vs. plan ($\geq 80\%$) y despliegue en ≥ 1 piloto |
| | Validación paralela con métodos tradicionales | Coordinador de proyecto | Desviación IA-método tradicional $\leq \pm 5\%$ y confianza de usuarios en resultados ($\geq 4/5$) |
| | Documentación de aprendizajes y ajustes | Responsable técnico | % de recomendaciones implementadas ($\geq 70\%$) y tasa de participación en retroalimentación ($\geq 60\%$) |
| Ajuste y escalamiento | Revisión crítica y optimización del modelo | Analista de datos / Presupuestos | Mejora de precisión vs. piloto ($\geq +10\%$) y reducción de tiempo de estimación ($\geq 15\%$) |
| | Formación continua y ampliación de usuarios | RRHH / Líder de implementación | % de usuarios objetivo certificados ($\geq 80\%$) y satisfacción/NPS interno ($\geq 4/5$ o NPS $\geq +30$) |
| | Integración con sistemas existentes (BIM/ERP) | Área TI / Ingeniería | IA interoperando en ≥ 1 plataforma corporativa y reducción de retrabajos manuales ($\geq 20\%$) |
| Integración plena | Definición de política interna sobre uso de IA | Alta dirección | Política aprobada y comunicada al 100% del personal clave y adopción formal en $\geq 90\%$ de áreas objetivo |
| | Seguimiento de indicadores de desempeño | PMO / Control de gestión | % de KPIs reportados a tiempo ($\geq 95\%$) y calidad de reporte validada por PMO (100%) |

| Etapa | Acción clave | Responsable sugerido | Indicador de éxito |
|-------------------|---|--|---|
| Integración plena | Establecimiento de ciclo de mejora continua | Todos los equipos involucrados | Ajustes implementados por año (≥ 2) y uso activo mensual (MAU) sobre usuarios previstos ($\geq 80\%$) y frecuencia de uso (≥ 2 veces/semana por usuario clave) |
| | Comunicación estratégica | Alta dirección / Comunicaciones internas | % de boletines emitidos según plan ($\geq 90\%$) y nivel de entendimiento del personal medido por encuesta ($\geq 4/5$) |

Nota: Elaboración propia.

Asimismo, se destaca que su diseño flexible y modular permite una aplicabilidad directa en el contexto costarricense, donde el sector construcción avanza en la incorporación de modelos BIM, digitalización de procesos y plataformas integradas para la gestión de proyectos. Esta guía, al reconocer distintos niveles de madurez digital, facilita que tanto empresas en fases iniciales de transformación como organizaciones con mayor desarrollo tecnológico encuentren un camino realista para introducir la inteligencia artificial en sus procesos de presupuestación. De esta manera, se asegura una adopción gradual y sostenible, considerando tanto las capacidades técnicas como los retos culturales y organizacionales propios del entorno local.

5.5 Cierre del capítulo

El análisis realizado a lo largo de este capítulo permitió estructurar una propuesta orientada a guiar la implementación de la Inteligencia Artificial en la etapa de presupuestación de proyectos de construcción. La hoja de ruta presentada se diseñó de manera progresiva, estableciendo fases claramente diferenciadas que permiten a las organizaciones avanzar paso a paso, desde la preparación de datos hasta la integración plena con herramientas como BIM y sistemas de gestión empresarial.

Asimismo, se desarrolló una guía práctica que acompaña a los profesionales en cada una de las etapas, destacando las actividades específicas que deben ejecutarse, los recursos requeridos y los posibles riesgos asociados. Esta guía busca no solo ofrecer un marco técnico, sino también generar una base cultural y organizacional que favorezca la adopción de la tecnología en contextos tradicionalmente resistentes al cambio.

De igual forma, la propuesta planteada reconoce la importancia de integrar el liderazgo técnico, la capacitación constante y el monitoreo de resultados como elementos indispensables para garantizar la sostenibilidad de la implementación. No se trata únicamente de introducir nuevas herramientas, sino de transformar gradualmente la manera en que se conciben y ejecutan los procesos de presupuestación, con un enfoque en la precisión, la eficiencia y la mejora continua.

El supuesto teórico formulado al inicio de la investigación planteaba que, aunque el uso de Inteligencia Artificial en la estimación de costos en proyectos de construcción se encuentra en una fase experimental, su integración podría generar beneficios en términos de precisión presupuestaria, eficiencia y toma de decisiones.

La propuesta desarrollada en este capítulo responde directamente a dicho planteamiento al ofrecer un marco estructurado que aborda los principales factores que actualmente limitan la implementación de la IA en presupuestación:

- **Falta de datos estructurados:** la hoja de ruta establece una fase inicial dedicada a la recolección, limpieza y estandarización de la información histórica de proyectos, reconociendo que sin esta base sólida los algoritmos de IA no pueden operar con precisión.
- **Resistencia al cambio cultural:** la guía práctica plantea estrategias de gestión del cambio, sensibilización y programas de capacitación progresiva que buscan generar confianza y aceptación en los equipos de trabajo.
- **Falta de liderazgo técnico:** se propone la conformación de equipos interdisciplinarios y la asignación de responsables con competencias en IA y gestión de proyectos, garantizando la dirección y supervisión adecuadas del proceso.
- **Interoperabilidad limitada:** se incorpora la necesidad de asegurar la integración gradual de la IA con sistemas como BIM y ERP, evitando la duplicidad de esfuerzos y favoreciendo la compatibilidad tecnológica.
- **Recursos económicos insuficientes:** la implementación se plantea bajo un esquema progresivo, lo que permite a las organizaciones ajustar las inversiones y minimizar riesgos financieros, logrando resultados en etapas tempranas sin comprometer la viabilidad del proyecto.

- **Ausencia de regulación específica:** aunque este aspecto trasciende la capacidad de acción directa de las empresas, se incluye en la propuesta la importancia del monitoreo regulatorio y la adopción de buenas prácticas que aseguren el cumplimiento normativo a futuro.

En consecuencia, se concluye que el planteamiento teórico se sustenta conceptualmente, dado que la hoja de ruta y la guía práctica permiten visualizar cómo la integración planificada de la IA puede contribuir a mejorar la precisión presupuestaria, la eficiencia y la toma de decisiones en proyectos de construcción. Sin embargo, se reconoce que su validación empírica requerirá futuras investigaciones aplicadas que permitan comprobar estos efectos en entornos empresariales reales.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

El presente capítulo recopila las principales conclusiones y recomendaciones derivadas de los objetivos de esta investigación. Estas reflexiones no solo sintetizan los hallazgos obtenidos, sino que también visibilizan las limitaciones enfrentadas durante el proceso y plantean oportunidades de mejora para futuros estudios. A través de un enfoque honesto y crítico, se busca aportar conocimiento útil tanto para investigadores que deseen profundizar en la temática, como para profesionales del sector construcción interesados en integrar herramientas de inteligencia artificial en sus procesos de presupuestación. Finalmente, se presenta una conclusión transversal que destaca la necesidad urgente de mantenerse en constante actualización frente al acelerado avance tecnológico que caracteriza a la industria actual.

6.1 Conclusiones

Conclusión general:

La investigación confirma que la integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la presupuestación de proyectos de construcción no es un problema exclusivamente tecnológico, sino organizacional y cultural. La IA demuestra potencial para mejorar precisión, tiempos y trazabilidad; no obstante, ese potencial solo se concreta cuando existe gobernanza de datos, validación cruzada IA–experto, interoperabilidad progresiva con BIM/ERP y gestión del cambio con indicadores. La propuesta de hoja de ruta y guía práctica opera como un puente entre ese potencial y su adopción real, al condicionar el escalamiento a umbrales de desempeño y a la madurez cultural y técnica de cada organización.

Conclusiones según los objetivos específicos:

a. Analizar las prácticas actuales de Inteligencia Artificial aplicadas a la elaboración de presupuestos de proyectos de construcción.

Las prácticas vigentes son útiles pero fragmentarias: la IA se emplea sobre todo en tareas repetitivas y de bajo riesgo (estimaciones preliminares, extracción de cantidades, análisis de históricos). Esto abre una oportunidad clara: priorizar casos de uso acotados con alto volumen y

bajo impacto de error para generar evidencia temprana, reducir la incertidumbre y alimentar un ciclo de mejora que conduzca a usos de mayor complejidad.

La confianza depende de criterios explícitos de validación: más que “acertar más”, la industria requiere demostrar cómo y cuándo la IA es confiable. El estudio infiere que definir ex-ante criterios de desempeño (p. ej., desviación aceptable frente al método tradicional, documentación del proceso y trazabilidad de datos) y mantener validación paralela con el criterio experto acelera la adopción y ordena el escalamiento.

Eficiencia con control: los beneficios en tiempos solo son valiosos si están anclados a estándares de calidad. La guía propuesta institucionaliza indicadores de precisión, tiempo y uso, evitando el “teatro tecnológico” y orientando la eficiencia hacia decisiones presupuestarias verificables.

b. Analizar las limitaciones técnicas, operativas y culturales que afectan la adopción de herramientas de Inteligencia Artificial en la gestión de costos.

La barrera crítica es cultural, no solo técnica: la resistencia al cambio y la “opacidad” percibida de la IA erosionan la aceptación. La evidencia sugiere que métricas culturales (apertura, participación, confianza), embajadores del cambio, espacios de diálogo y formación situada son mecanismos determinantes para convertir pilotos en adopción sostenida.

La calidad de datos es condición de entrada: sin estandarización, custodio de datos y diccionarios semánticos, la precisión de modelos se degrada. La investigación infiere que introducir *checkpoints* de alistamiento de datos antes del piloto (gobernanza mínima viable, fuentes, formatos, trazabilidad) reduce retrabajos y evita falsas expectativas.

Interoperabilidad y recursos: la integración con BIM/ERP no debe ser “todo o nada”; interoperabilidad progresiva (primero un flujo, luego otro) y inversión modular (capex distribuido por fases con retornos parciales) mitigan restricciones presupuestarias y disminuyen riesgos operativos.

c. Extraer lecciones aplicables a la presupuestación a partir de un análisis comparativo entre casos de éxito en la aplicación de Inteligencia Artificial en distintas áreas de la gestión de proyectos de construcción.

Gradualismo con umbrales de decisión: los casos exitosos comparten pilotos con criterios claros para escalar o detener (precisión relativa, ganancia de tiempo, estabilidad del flujo). Trasladado a presupuestación, esta lógica reduce adopciones simbólicas y focaliza recursos donde la IA demuestra valor.

Multidisciplinariedad crea confianza: equipos que combinan presupuestista + ingeniería + analítica de datos logran mejor ajuste de modelos y mejor apropiación por los usuarios. La lección trasladada es que la validación no es solo técnica; requiere coproducción entre expertos de negocio y de datos.

Transparencia y auditoría: prácticas como documentar supuestos, versionar modelos y mantener rastro de evidencias (auditabilidad) incrementan legitimidad. En presupuestación, esto se traduce en trazabilidad del estimado y aprendizaje organizacional para futuros proyectos.

d. Diseñar una propuesta estratégica para la integración de Inteligencia Artificial en la presupuestación de proyectos de construcción.

Secuenciación que alinea técnica y cultura: la hoja de ruta en cuatro fases (Exploración → Piloto controlado → Ajuste y escalamiento → Integración plena) opera como “andamiaje” que sincroniza madurez de datos, interoperabilidad y gestión cultural. Esta secuencia convierte la incertidumbre en aprendizaje y la evidencia en política interna.

Gobernanza con indicadores evita el “salto al vacío”: incorporar KPIs técnicos y culturales, gatillos de escalamiento y bucles de retroalimentación asegura que cada avance sea reversible si no se cumplen umbrales. Esto proporciona control directivo, reduce riesgos financieros y sostiene la mejora continua.

Adaptabilidad al contexto costarricense: al modularizar inversiones, usar interoperabilidad mínima viable y alinear con prácticas BIM y digitalizaciones locales, la propuesta resulta aplicable en organizaciones con distintos niveles de madurez, manteniendo viabilidad y trazabilidad.

Conclusiones transversales:

Validación condicionada de la hipótesis: la hipótesis se corrobora de forma condicionada: la IA sí puede mejorar precisión, eficiencia y soporte a decisiones cuando existen datos gobernados, validación cruzada, liderazgo y gestión cultural. Sin esas precondiciones, su adopción se vuelve marginal.

Muestra acotada y necesidad de longitudinalidad: el tamaño muestral y el horizonte temporal impiden generalizar plenamente los efectos. Se infiere la necesidad de pilotos longitudinales (múltiples empresas, varios proyectos) para cuantificar impactos y ajustar la hoja de ruta con evidencia sectorial.

Brecha regulatoria y política interna: ante la ausencia de regulación específica, políticas internas (estándares de datos, responsabilidades, auditoría de modelos) suplen ese vacío y fortalecen la legitimidad hasta que existan marcos formales.

Línea de continuidad académica y profesional: el trabajo abre una agenda de investigación aplicada (métricas de precisión por tipología de obra, costos de transición, gobierno del dato en PyMEs) y una agenda profesional (madurez digital, formación interdisciplinaria, contratos que reconozcan resultados asistidos por IA).

6.2 Recomendaciones

a. Investigadores/as y tesistas

Se recomienda delimitar con mayor precisión los alcances temáticos y técnicos desde las etapas iniciales de los estudios sobre inteligencia artificial en la construcción. En esta investigación, una delimitación más específica, por ejemplo, centrarse en un tipo de herramienta como modelos predictivos o análisis de datos históricos, habría permitido profundizar más en los hallazgos. Además, es clave diseñar mecanismos que permitan mantener actualizado el marco teórico durante todo el proceso, dado el dinamismo de los avances tecnológicos. Esto puede lograrse mediante alertas automáticas en bases de datos académicas o revisiones periódicas programadas. También se sugiere adoptar metodologías ágiles e iterativas, que permitan ajustar el enfoque conforme evoluciona la comprensión del fenómeno estudiado. Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones combinen los estudios perceptuales con experiencias prácticas, como pilotos o estudios de campo, que enriquezcan la evidencia con datos empíricos.

b. Profesionales en gestión de proyectos de construcción

Los profesionales encargados de liderar proyectos deben asumir un rol activo en la integración de tecnologías emergentes como la IA. Se recomienda fortalecer sus capacidades en análisis de datos y herramientas de presupuestación digital mediante programas de actualización continua. Asimismo, deben promover la alineación entre diseño, planificación y presupuestación desde las etapas tempranas del proyecto, fomentando el trabajo interdisciplinario. Estos profesionales también pueden impulsar mecanismos de mejora continua, como reuniones post-mortem y documentación sistemática de lecciones aprendidas, que retroalimenten los procesos de estimación de costos. Finalmente, se sugiere que gestionen el cambio dentro de sus equipos, generando espacios de formación y participación que permitan reducir resistencias y favorecer la apropiación tecnológica.

c. Universidades, centros de investigación y docentes

Las universidades y centros de investigación deben fomentar alianzas tempranas con el sector productivo, especialmente con empresas constructoras, para asegurar la aplicabilidad de los estudios y promover la transferencia de conocimiento en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la presupuestación. Involucrar actores del sector desde el diseño de los proyectos de investigación facilita el acceso a datos estructurados, la implementación de pruebas piloto con herramientas de IA y la validación de resultados en contextos reales.

Asimismo, se recomienda que los programas académicos incluyan de manera explícita contenidos sobre IA aplicada a la gestión de costos y presupuestación, con un enfoque práctico que considere tanto las dimensiones técnicas (modelos predictivos, automatización, interoperabilidad con BIM/ERP) como las dimensiones culturales (resistencia al cambio, confianza en los sistemas automatizados). De este modo, los futuros profesionales estarán preparados no solo para utilizar herramientas digitales, sino también para liderar procesos de transformación digital en entornos de construcción.

La participación de expertos en tecnologías de información (TI) y en IA desde etapas iniciales de los proyectos académicos puede fortalecer el diseño metodológico, la calidad del análisis de datos y la interpretación de hallazgos, especialmente en áreas críticas como validación de algoritmos, gobernanza de datos e integración con plataformas digitales.

Finalmente, se sugiere generar herramientas de divulgación, como glosarios de conceptos clave de IA, fichas resumen de modelos aplicados, guías metodológicas o visualizaciones interactivas, que faciliten la comprensión de esta temática para estudiantes y profesionales de la construcción no especializados en inteligencia artificial. Estas herramientas también pueden servir como puentes entre la academia y el sector productivo, reduciendo la brecha entre teoría y práctica en la adopción de IA en presupuestación.

d. Consultores/as y responsables de transformación digital en empresas

Se recomienda que las personas responsables de impulsar procesos de digitalización desarrollen herramientas de análisis que ayuden a priorizar barreras internas, como matrices de decisión según nivel de madurez digital o tamaño de empresa. Esta práctica facilitará la planificación de la adopción de IA en función de la capacidad real de cada organización. Además, se sugiere que las estrategias tecnológicas consideren no solo los aspectos técnicos, sino también los culturales y organizacionales. En particular, los instrumentos de diagnóstico deben ser sensibles a factores como la resistencia al cambio, la existencia de brechas generacionales, y la carencia de infraestructura digital. Comprender estas dimensiones es crucial para diseñar planes de adopción viables, sostenibles y adaptados al contexto.

e. Cámaras del sector construcción y redes profesionales

Las cámaras sectoriales pueden desempeñar un papel clave en la consolidación de repositorios actualizados sobre herramientas de IA, especialmente en idioma español y con enfoque local. Se recomienda desarrollar un sistema colaborativo donde profesionales, empresas, universidades y consultores aporten información sobre nuevas soluciones tecnológicas, evaluaciones de uso, lecciones aprendidas y recomendaciones. Esta base de conocimiento permitiría a las empresas tomar decisiones más informadas sobre su estrategia de adopción tecnológica y facilitaría la diseminación de buenas prácticas en toda la región. Adicionalmente, estas organizaciones pueden liderar espacios de formación continua, seminarios y encuentros regionales que fortalezcan la cultura digital del sector.

f. Desarrolladores/as de soluciones tecnológicas

Se sugiere convertir la hoja de ruta propuesta en esta tesis en una herramienta digital interactiva, que permita a las empresas constructoras evaluar su situación actual, obtener un diagnóstico de madurez digital y recibir recomendaciones personalizadas para implementar IA en presupuestación. El enfoque diferenciador de esta herramienta radica en que no se limita a replicar marcos genéricos de adopción tecnológica, sino que incorpora los elementos distintivos de la propuesta: (i) gestión cultural como eje transversal, con métricas específicas para monitorear la apertura y confianza del personal; (ii) indicadores técnicos y organizacionales verificables en cada fase, superando el uso de entregables como pseudoindicadores; (iii) umbrales claros para la toma de decisiones en el paso de piloto a escalamiento, reduciendo riesgos de adopción simbólica; y (iv) un diseño pragmático de interoperabilidad con BIM y ERP bajo estandarización mínima viable. Esta diferenciación garantiza que la herramienta no solo acompañe técnicamente, sino que gestione dimensiones críticas, culturales, económicas y de legitimidad institucional, que han sido identificadas como barreras en el sector construcción costarricense.

g. Entidades formadoras y equipos de capacitación

Los equipos responsables de la capacitación en empresas y entidades educativas deben acompañar la adopción tecnológica con programas de formación continua y específica. Se recomienda el diseño de talleres prácticos sobre IA aplicada a la presupuestación, cursos básicos de ciencia de datos, y uso de herramientas como Power BI o plataformas colaborativas con IA integrada. Además, es necesario incorporar contenidos orientados a gestionar el cambio organizacional, incluyendo estrategias para superar resistencias y promover la participación activa del personal técnico. La formación debe estar diseñada para distintos niveles de experiencia y contemplar tanto la teoría como la aplicación práctica en escenarios reales de obra o planificación.

h. Equipos de investigación interdisciplinarios

Los grupos de investigación que participen en proyectos de transformación digital deben asegurar la validez de sus instrumentos antes de aplicarlos. Para ello, resulta recomendable realizar pruebas piloto que permitan ajustar escalas, identificar posibles ambigüedades y garantizar la comprensión de las preguntas por parte de los distintos perfiles participantes. Asimismo, se sugiere emplear herramientas especializadas de análisis cualitativo al trabajar con entrevistas, encuestas

abiertas o casos documentados. Estas plataformas facilitan una codificación más profunda, favorecen la identificación de patrones transversales y fortalecen la robustez del análisis de datos cualitativos en investigaciones con múltiples fuentes.

i. Analistas cualitativos y evaluadores de programas

Una recomendación clave es poner atención a las tensiones o contradicciones que emergen del análisis de datos, ya sea entre las percepciones de diferentes actores o entre encuestas y entrevistas. Estas discrepancias pueden revelar resistencias al cambio, vacíos de comunicación o diferencias estructurales entre empresas, y ofrecen información valiosa para ajustar estrategias de implementación tecnológica. Se sugiere adoptar un enfoque interpretativo que vaya más allá de la descripción de datos y busque comprender los significados subyacentes detrás de los discursos.

j. Empresas constructoras y equipos de innovación

Se recomienda utilizar la hoja de ruta propuesta en esta investigación como marco de referencia estratégico para orientar la adopción de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos. Este marco, construido a partir de evidencia empírica y revisión teórica, ofrece lineamientos prácticos que las empresas pueden adaptar según su tamaño, nivel de madurez digital y recursos disponibles. Asimismo, se sugiere iniciar la adopción de IA mediante modelos predictivos sencillos, integrados en herramientas familiares para el equipo técnico. La implementación de pilotos en proyectos de menor envergadura puede facilitar la apropiación gradual, reducir resistencias culturales y sentar las bases para un escalamiento progresivo en la organización.

k. Equipos técnicos y desarrolladores de software

Una de las recomendaciones más relevantes es transformar las propuestas metodológicas, como la hoja de ruta desarrollada en esta tesis, en herramientas prácticas y digitales. Estas herramientas deben permitir la autoevaluación, el monitoreo del progreso y la generación automática de planes de acción. La posibilidad de personalización según tipo de empresa, tamaño y nivel de digitalización será clave para su adopción. Además, se sugiere diseñar interfaces accesibles, que no requieran conocimientos técnicos avanzados, de forma que cualquier profesional del sector pueda utilizar la herramienta sin barreras tecnológicas significativas.

I. Gestión de la cultura organizacional

Para que la implementación de herramientas de Inteligencia Artificial en la presupuestación sea efectiva, resulta esencial gestionar de forma planificada la cultura organizacional. Se recomienda promover un entorno que favorezca la apertura al cambio, la colaboración interdisciplinaria y el aprendizaje continuo. Esto implica comunicar claramente los beneficios esperados de la transformación digital, capacitar al personal en competencias tecnológicas y reconocer los esfuerzos asociados con la innovación. Asimismo, es importante fortalecer el liderazgo participativo y generar espacios de diálogo donde los colaboradores puedan expresar sus percepciones y preocupaciones frente a la adopción de nuevas tecnologías. Una gestión adecuada de la cultura permitirá reducir la resistencia al cambio y consolidar un entorno organizacional preparado para la integración sostenible de la IA.

Capítulo 7. Referencias bibliográficas

- Aa, F., M, M., H, H., & Almamlook, R. (2018a). Overview Success Criteria and Critical Success Factors in Project Management. *Industrial Engineering & Management*, 07(01). <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000244>
- Aa, F., M, M., H, H., & Almamlook, R. (2018b). Overview Success Criteria and Critical Success Factors in Project Management. *Industrial Engineering & Management*, 07(01). <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000244>
- Abed, Y., Hasan, T., Zehawi, R., & Maseer, Z. (2022). Machine Learning Algorithms for Constructions Cost Prediction: A Systematic Review. *Desconocido*, 1–12.
- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O., & Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103299>
- Akanbi, T., & Zhang, J. (2021). Design information extraction from construction specifications to support cost estimation. *Automation in Construction*, 131, 103835. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103835>
- Alastair. (2024). Future trends in Construction Estimating. *Measure Manage*. <https://measuremanage.com.au/blog/future-trends-in-construction-estimating/>
- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to Machine Learning* (3rd ed.). Massachusetts Institute of Technology. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dl.matlabayar.com/siavash/ML/Book/Ethem%20Alpaydin-Introduction%20to%20Machine%20Learning-The%20MIT%20Press%20\(2014\).pdf](https://dl.matlabayar.com/siavash/ML/Book/Ethem%20Alpaydin-Introduction%20to%20Machine%20Learning-The%20MIT%20Press%20(2014).pdf)
- Arboleda, J., & Romero, S. (2023). *Comparación entre metodologías BIM y CAD en la presupuestación de proyectos de vivienda de interés social en El Dorado, Meta* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26294>
- Ayinla, K., Saka, A., Seidu, R., & Madanayake, U. (2023). *The Impact of Artificial Intelligence on Construction Costing Practice*. 65–74. https://www.researchgate.net/publication/373755997_The_Impact_of_Artificial_Intelligence_on_Construction_Costing_Practice

- Bardu, A.-M., & Sandu, M. (2020). The importance and necessity of cost management of construction projects. *Urbanism. Arhitectură. Construcții*, 11(2), 215–224.
- Bazel, M. A., Mohammed, F., Baarimah, A. O., Alawi, G., Al-Mekhlafi, A.-B. A., & Almuahaya, B. (2024). The Era of Industry 5.0: An Overview of Technologies, Applications, and Challenges. In F. Saeed, F. Mohammed, & Y. Fazea (Eds.), *Advances in Intelligent Computing Techniques and Applications* (Vol. 211, pp. 274–284). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59707-7_24
- Beshah, G. G., Jekale Mengesha, W., & Demiss, B. A. (2024). A literature review on construction project success evaluation criteria and methods. *Cogent Engineering*, 11(1), 2376220. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2376220>
- Blocher, E., Stout, D., & Cokins, G. (2010). *Cost management: A strategic emphasis* (5th ed.). McGraw-Hill Irwin.
- Bluebeam. (2023). Casos prácticos del sector de la construcción. *Clientes Bluebeam*. <https://www.bluebeam.com/es/customers/>
- Caccamese, A., & Bragantini, D. (2012). *Beyond the iron triangle*. PMI Global Congress 2012, Marseille, Francia.
- Cantarell, C. C., & Flyvbjerg, B. (2017). Reference class forecasting for Hong Kong's major roadworks projects. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1710.09419>
- Castro Miranda, S. L., Del Rey Castillo, E., Gonzalez, V., & Adafin, J. (2022). Predictive Analytics for Early-Stage Construction Costs Estimation. *Buildings*, 12(7), 1043. <https://doi.org/10.3390/buildings12071043>
- Chen, K., Zhou, X., Bao, Z., Skibniewski, M. J., & Fang, W. (2024). Artificial intelligence in infrastructure construction: A critical review. *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.1007/s42524-024-3128-5>
- Chen, Q., & Sheng, N. (2022). Application of Machine Learning Algorithm in Stadium Engineering Building Information Model Management System. *Mobile Information Systems*, 2022, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2022/8454443>
- Choi, J., Kim, H., & Kim, I. (2015). Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(1), 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2014.11.002>

- Cholakis, P. (2012). The evolution of construction cost estimating and project management technology. *Construction Economist*, 12–14.
- CostOS. (s.f.). <https://www.cost-os.com>
- Czarnecki, S., & Lewiński, T. (2021). Vibrations of bars including transverse shear deformations and warping due to torsion. *Archives of Civil Engineering*, 355–381. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137173>
- Dam, H. K., Tran, T., Grundy, J., Ghose, A., & Kamei, Y. (2018). *Towards effective AI-powered agile project management* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1812.10578>
- Datta, S. D., Islam, M., Rahman Sobuz, Md. H., Ahmed, S., & Kar, M. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(5), e26888. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>
- Davahli, M. R. (2020). *The Last State of Artificial Intelligence in Project Management* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2012.12262>
- Desconocido. (2023). Métodos de Estimación en la gestión de proyectos: Descripción y aplicación práctica. *Dharma Consulting*. <https://dharmacon.net/2023/07/27/metodos-de-estimacion-en-la-gestion-de-proyectos-descripcion-y-aplicacion-practica/>
- Finch, J. (2013). Construction Estimating Guide, An overview of estimating tools and software. *Software Advice*. https://es.scribd.com/document/414625028/construction-estimating-software-guide-pdf?doc_id=414625028&download=true&order=654307610
- Gómez-Valdés, M., Acevedo-Acevedo, S., Alvarado-Acuña, L., & Iturra-Molina, R. (2023). Impacto de la metodología BIM en la gestión de proyectos de construcción. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i7.6860>
- González-Rodríguez, S. (2024). Impacto de las incertidumbres aleatorias, estocásticas y epistémicas en las reservas de contingencia de costos de proyectos. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2406.03500>
- Gutiérrez, Y., López, M., & López, C. (2023). La gestión de la calidad y sus costos en el sector de la construcción. *Revista Cubana de Finanzas y Precios*. https://www.mfp.gob.cu/revista/index.php/RCFP/article/view/07_V7N42023_YGGyOtro

- Guzmán Sánchez, J. C. (2023). Procedimiento para el control de costos y plazos en la gestión de proyectos en la fase de ejecución. Caso gobiernos autónomos municipales de Cochabamba-Bolivia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), 7357–7356. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5885
- Idan, M. F., & Dheyab, S. N. (2019). Estimate Costs Management in Construction Projects. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(19), 3734–3741.
- Ivanova, S., Kuznetsov, A., Zverev, R., & Rada, A. (2023). Artificial Intelligence Methods for the Construction and Management of Buildings. *Sensors*, 23(21), 8740. <https://doi.org/10.3390/s23218740>
- Juszczyk, M., Zima, K., & Lelek, W. (2019). FORECASTING OF SPORTS FIELDS CONSTRUCTION COSTS AIDED BY ENSEMBLES OF NEURAL NETWORKS. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 25(7), 715–729. <https://doi.org/10.3846/jcem.2019.10534>
- Kerzner, H. (2017). *Project Management, A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (Vol. 12). John Wiley & Sons, Inc.
- Knauf, R., Gonzalez, A. J., & Jantke, K. P. (1999). Validating rule-based systems: A complete methodology. *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)*, 5, 744–749. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1999.815644>
- Liu, Z., & Ma, Z. (2015). Establishing Formalized Representation of Standards for Construction Cost Estimation by using Ontology Learning. *Procedia Engineering*, 123, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.093>
- Luna, A. (2025). Earned Value Management in Construction: A Review of Current Practices. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(3). https://www.researchgate.net/publication/393476459_Earned_Value_Management_in_Construction_A_Review_of_Current_Practices
- Mayo-Alvarez, L., Alvarez-Risco, A., Del-Aguila-Arcentales, S., Sekar, M. C., & Yañez, J. A. (2022). A Systematic Review of Earned Value Management Methods for Monitoring and Control of Project Schedule Performance: An AHP Approach. *Sustainability*, 14(22), 15259. <https://doi.org/10.3390/su142215259>

- Medina Romero, M. Á., Hurtado Tiza, D. R., Muñoz Murillo, J. P., Ochoa Cervantez, D. O., & Izundegui Ordóñez, G. (2023). *Método mixto de investigación: Cuantitativo y cualitativo* (1st ed.). Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.105>
- Mendoza, J. G., Quispe, M. B., & Muñoz, S. P. (2022). Una revisión sobre el rol de la inteligencia artificial en la industria de la construcción. *Ingeniería y Competitividad*. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11406>
- Merz, M. (2019). The evolution of Construction Estimating: Efficiency in 2019. *The Thunderbolt Innovation*. https://www.thunderboltinnovation.com/thunderbolt_university/the-evolution-of-construction-estimating/
- Mitrtech. (s.f.). *Ejemplos y guía de gestión de riesgos en hojas de cálculo*. <https://mitrtech.com/es-la/spreadsheet-risk-management/>
- Morales, D. A. (2017). Técnicas de inteligencia artificial aplicadas a problemas de ingeniería civil. *Universidad y Ciencia*. <https://www.redalyc.org/pdf/1939/193955164005.pdf>
- Na, S., Heo, S., Han, S., Shin, Y., & Roh, Y. (2022). Acceptance Model of Artificial Intelligence (AI)-Based Technologies in Construction Firms: Applying the Technology Acceptance Model (TAM) in Combination with the Technology–Organisation–Environment (TOE) Framework. *Buildings*, 12(2), 90. <https://doi.org/10.3390/buildings12020090>
- Nabizadeh Rafsanjani, H., & Nabizadeh, A. H. (2023). Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Computers in Human Behavior Reports*, 11, 100319. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100319>
- Okereke, R. A., Zakariyau, M., & Eze, E. (2022a). The Role of Construction Cost Management Practices on Construction Organisations' Strategic Performance. *Journal of Project Management Practice*, 2(1), 20–39. <https://doi.org/10.22452/jpmp.vol2no1.2>
- Okereke, R. A., Zakariyau, M., & Eze, E. (2022b). The Role of Construction Cost Management Practices on Construction Organisations' Strategic Performance. *Journal of Project Management and Practice*, 2(1), 20–39.
- Okereke, R. A., Zakariyau, M., & Eze, E. (2022c). The Role of Construction Cost Management Practices on Construction Organisations' Strategic Performance. *Journal of Project Management Practice*, 2(1), 20–39. <https://doi.org/10.22452/jpmp.vol2no1.2>

- Pishdad, P., & Onungwa, I. O. (2024). Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 525–548. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.024>
- PlanSwift. (s.f.). <https://www.planswift.com>
- Presto. (s.f.). <https://presto-software.com>
- Prieto, R. (2020). Verification and Validation of Project Management Artificial Intelligence. *NAN Executive Insights*. <https://www.researchgate.net/publication/342452507>
- Project Management Institute. (2017). *Guía del PMBOK, Guía de los fundamentos para la gestión de proyectos* (Vol. 6). Project Management Institute, Inc.
- Project Management Institute. (2021). *PMBOK Guide, A guide to the project management body of knowledge and the standard of project management* (Vol. 7). Project Management Institute, Inc.
- Rane, N. (2023). Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) for Smart Construction Schedule, Cost, Quality, and Safety Management: Challenges and Opportunities. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4616055>
- Rashid, A. B., & Kausik, M. A. K. (2024). AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications. *Hybrid Advances*, 7, 100277. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100277>
- S10 Perú. (s.f.). <https://www.s10peru.com/presupuestos>
- Sage Estimating. (s.f.). <https://www.sage.com/en-us/products/sage-estimating>
- Saparamadu, A. (2025). *Using AI to Estimate Construction Costs Before Starting a Project*. <https://www.linkedin.com/pulse/ai-practice-using-estimate-construction-costs-before-saparamadu-ibr2c/>
- Sorce, J., & Issa, R. R. A. (2021). Extended Technology Acceptance Model (TAM) for adoption of Information and Communications Technology (ICT) in the US Construction Industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 227–248. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.013>
- Stojcetovic, B., Lazarevic, D., Princevic, B., Stajcic, D., & Miletic, S. (2014). *Project managment: Cost, time and quality*. 345–350. <https://www.researchgate.net/publication/305462896>

- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*.
file:///C:/Users/Crystal/Downloads/VenkateshUserAcceptanceofInformationTechnology2003.pdf
- Vera Jaime, D. (2024). *Análisis del presupuesto y programación de una obra civil de infraestructura educativa en Támesis, Colombia* [Universidad de Antioquia].
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/40440>
- Villegas, M. Á., & Rincón de Parra, H. C. (2011). Gestión de Costos en los Proyectos: Un abordaje teórico desde las mejores prácticas del Project Management Institute. *Visión Gerencial*, 1, 85–94.
- Viter, I. (2024). The Long & Short of Project Cost Management [Runn]. *Get Better at Project & Resource Management*. <https://www.runn.io/blog/project-cost-management#why-is-project-cost-management-important>
- Widjaja, D. D., Kim, D.-Y., & Kim, S. (2023). Crafting an Automated Algorithm for Estimating the Quantity of Beam Rebar. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 23(4), 485–496. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2023.23.4.485>

Capítulo 8 Apéndices

8.1 Apéndice A: Ficha Bibliográfica

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Ficha Bibliográfica

Fecha: _____

Título del documento: _____

Autor(es): _____

Fuente: _____

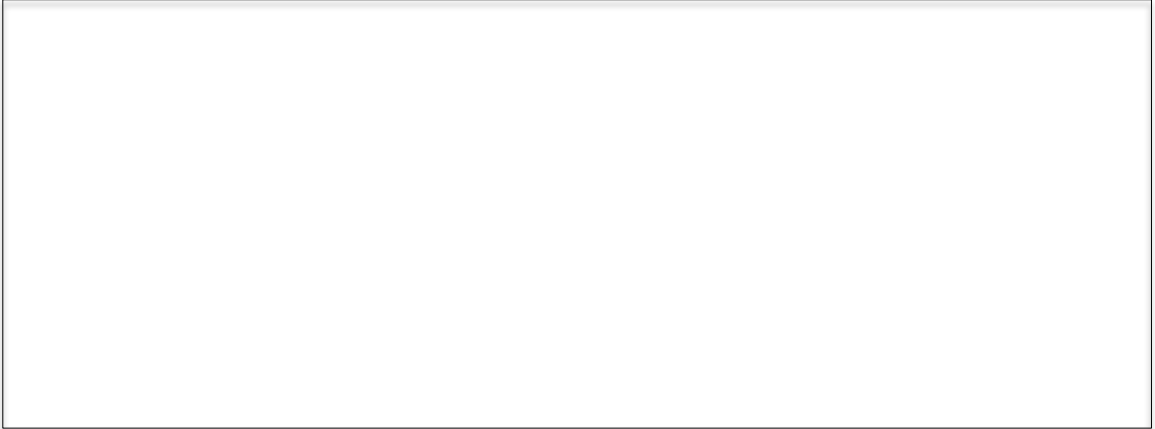
Resumen:

Palabras clave: _____

Categoría de análisis: _____

Relevancia para la investigación:

Citas destacadas:

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for writing highlighted quotes.

Notas adicionales:

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for writing additional notes.

8.2 Apéndice B: Guías de Entrevistas

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Guía de Entrevista #1 (Expertos en presupuestación de proyectos de construcción)

Estimado/a participante:

Reciba un cordial saludo. Le agradezco de antemano por su valioso tiempo y disposición para colaborar en esta investigación.

Esta entrevista busca conocer su experiencia y percepción sobre los desafíos, oportunidades y limitaciones actuales en la gestión de presupuestos dentro del sector construcción, así como su visión respecto a la posible implementación de herramientas basadas en Inteligencia Artificial (IA) en este proceso.

Sus aportes permitirán comprender la realidad actual de la industria y aportar al desarrollo de propuestas que fortalezcan la precisión y eficiencia de la presupuestación. La información recolectada será utilizada únicamente con fines académicos y será tratada con total confidencialidad.

a. Datos Generales del Entrevistado

- Nombre (Opcional): _____
- Cargo: _____
- Empresa: _____
- Años de experiencia en la industria: _____
- Nivel de automatización en presupuestación: Bajo / Medio / Alto (Explicar)
- Conocimiento en IA aplicada a la presupuestación: Bajo / Medio / Alto (Explicar)
- ¿Ha participado en procesos de implementación de IA? Sí / No (Explicar)

b. Gestión de Proyectos de Construcción

1. ¿Cuáles considera son los principales desafíos en los proyectos de construcción hoy día?
2. ¿Cuáles son los principales problemas o errores comunes en la planificación y ejecución de proyectos de construcción?
3. Enumere las 3 principales necesidades en el área.
4. ¿Cuáles considera serán las tendencias de la gestión de proyectos de construcción en los próximos 10 años?

c. Prácticas Actuales de Presupuestación

5. Describa el proceso típico de presupuestación en su organización.
6. ¿Qué software y herramientas utilizan para la estimación de costos?
7. ¿Cuáles son los principales problemas o errores comunes en la presupuestación?
8. En una escala del 1 al 5, califique la precisión de los presupuestos realizados en su empresa.
9. ¿Qué porcentaje de los proyectos experimenta desviaciones presupuestarias? (0-20% / 21-40% / 41-60% / 61-80% / 81-100%)
10. ¿Cómo se realiza el control de costos durante la ejecución de los proyectos?
11. ¿Existe algún mecanismo formal para la mejora continua en presupuestación?

d. Conocimiento y Percepción sobre IA

12. ¿Ha considerado su empresa el uso de IA en presupuestación? Sí / No / En exploración
13. ¿En qué aspectos cree que la IA podría mejorar la presupuestación? (Seleccione todas las que apliquen)
 - Reducción de errores humanos
 - Predicción de costos más precisa
 - Optimización de insumos y recursos
 - Reducción del tiempo de estimación
 - Análisis de riesgos financieros
 - Identificación de tendencias de costos
 - Mejora en la toma de decisiones
14. ¿Considera que la IA podría reemplazar el papel del estimador humano? (Totalmente / Parcialmente / No / No sé)

e. Barreras para la Implementación de IA

15. Identifique los principales obstáculos para la implementación de IA en presupuestación:
 - Costo de inversión
 - Falta de conocimientos en IA
 - Resistencia al cambio en la industria
 - Falta de software especializado
 - Falta de datos estructurados
 - Otros: _____
16. ¿Qué medidas considera necesarias para facilitar la adopción de IA en la presupuestación?

f. Oportunidades y Recomendaciones

17. ¿Cómo cree que la IA impactará la industria de presupuestación en los próximos 5 años?
18. ¿Qué estrategias recomendaría para una implementación exitosa de IA en presupuestación?

19. ¿Qué capacitación o formación considera esencial para mejorar la adopción de IA en presupuestación?
20. ¿Hay algún otro comentario o recomendación que desee agregar?

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Guía de Entrevista #2 (Expertos en construcción con conocimientos n IA)

Estimado/a participante:

Reciba un cordial saludo. Le agradezco de antemano por su valioso tiempo y disposición para colaborar en esta investigación.

Esta entrevista tiene como propósito recopilar información cualitativa sobre su experiencia y perspectiva respecto a la implementación de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) en la presupuestación de proyectos de construcción. La información obtenida será utilizada exclusivamente con fines académicos en el marco de un trabajo final de graduación para optar por el grado de Máster en Gerencia de Proyectos.

Su participación es completamente voluntaria y confidencial. Los datos recolectados no serán asociados a su nombre ni a ninguna información personal identificable. Su experiencia y conocimientos aportarán significativamente a los hallazgos de esta investigación.

a. Datos Generales del Entrevistado

- Nombre (Opcional): _____
- Cargo: _____
- Empresa: _____
- Años de experiencia en la industria: _____
- Experiencia en implementación de IA: Sí / No (Especificar)

b. Estado Actual de la Digitalización en Construcción

1. ¿Cuáles son las principales tendencias tecnológicas que están impactando la construcción?
2. ¿Qué tan digitalizada considera que está la industria de la construcción actualmente?
3. ¿Cuál es el nivel de adopción de IA en la construcción?
4. ¿Cuáles son las áreas dentro de la construcción donde la IA ha sido más efectiva?
5. ¿Qué factores están impulsando la digitalización en la construcción?

Aplicación de IA en Presupuestación

6. ¿Conoce casos de implementación de IA en presupuestación?
7. ¿Cuáles son los principales beneficios que ha observado en el uso de IA en presupuestación?
8. ¿En qué fases del proceso de presupuestación cree que la IA podría tener mayor impacto?

9. ¿Existen estudios o referencias que respalden la efectividad de la IA en la estimación de costos?
10. ¿Cómo se comparan los resultados entre presupuestos tradicionales y aquellos con IA?

Limitaciones y Barreras

11. ¿Cuáles son los mayores desafíos para la adopción de IA en construcción?
12. ¿Cuáles son los temores más comunes respecto a la IA en la industria?
13. ¿Considera que la regulación o normativas actuales afectan la implementación de IA en construcción?
14. ¿Cree que la IA puede integrarse con otros sistemas tecnológicos como BIM o ERP?

Estrategias y Futuro de la IA en Construcción

15. ¿Qué estrategias considera clave para fomentar la adopción de IA en presupuestación?
16. ¿Cómo pueden colaborar empresas, universidades y gobiernos en la implementación de IA?
17. ¿Qué cambios en la educación y capacitación se requieren para aumentar el uso de IA en construcción?
18. ¿Cree que la IA se convertirá en un estándar en presupuestación en los próximos 10 años?
19. ¿Algún otro comentario o reflexión sobre la IA en construcción?

8.3 Apéndice C: Cuestionario

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Cuestionario Estructurado

Agradecimiento:

Agradecemos su participación en este cuestionario, cuyo propósito es contribuir a la investigación sobre la validación de datos provenientes de modelos de inteligencia artificial en la etapa de presupuestación de proyectos de construcción. Sus respuestas son valiosas y ayudarán a obtener una visión más clara sobre la percepción y el impacto de estas tecnologías en la industria.

Objetivo:

El objetivo de este cuestionario es recopilar información sobre la experiencia, conocimientos y percepción de los profesionales de la construcción con respecto al uso de inteligencia artificial en la presupuestación de proyectos. Se busca identificar patrones, barreras de adopción y oportunidades de mejora en la gestión de costos.

Cláusulas de Confidencialidad:

- Este cuestionario es de uso académico y los datos recopilados serán utilizados únicamente con fines investigativos.
- La información proporcionada es confidencial y no será compartida con terceros.
- No es obligatorio proporcionar información personal.

SECCIÓN 1: PERFIL DEL ENCUESTADO

1. Edad:

Menos de 25 años

25-34 años

35-44 años

45-54 años

55 años o más

2. Sexo:

Masculino

Femenino

Prefiero no decirlo

3. Cargo actual:

Estimador

Gerente de proyectos

Ingeniero residente

Director de construcción

Otro (especifique)

4. ¿Posee formación en gestión de proyectos?
 Sí, con certificación formal (Ej. PMP, PRINCE2)
 Sí, con formación académica en el área
 Sí, con experiencia práctica pero sin certificaciones formales
 No

5. Años de experiencia en la industria de la construcción:
 Menos de 1 año
 1-3 años
 4-6 años
 7-10 años
 Más de 10 años

6. Tipo de empresa:
 Contratista general
 Subcontratista
 Consultora
 Desarrolladora inmobiliaria
 Otro (especifique)

7. Tamaño promedio de los proyectos en los que participa (USD):
 Menos de 100,000
 100,000 - 500,000
 500,000 - 1,000,000
 1,000,000 - 5,000,000
 Más de 5,000,000

SECCIÓN 2: PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

8. ¿Cuáles son los principales desafíos en proyectos de construcción?
 Falta de planificación adecuada
 Problemas en la gestión del presupuesto
 Retrasos en la entrega de materiales
 Mano de obra no calificada
 Falta de integración tecnológica
 Otro (especifique)

9. ¿Cómo impactan estos desafíos en la rentabilidad y plazos de los proyectos?
 Aumentan significativamente los costos
 Generan retrasos en la ejecución
 Disminuyen la calidad del proyecto final
 No tienen un impacto significativo

10. ¿Cuáles considera que son las principales necesidades en la ejecución de proyectos de construcción?
 Mayor capacitación del personal

- Herramientas digitales para gestión de costos
- Optimización en la estimación de presupuestos
- Mejora en la coordinación entre equipos
- Reducción de costos imprevistos
- Otro (especifique)

11. ¿Qué estrategias utiliza actualmente su empresa para mitigar riesgos financieros en los presupuestos?

- Revisiones continuas y auditorías
- Uso de herramientas digitales
- Análisis de costos históricos
- Reservas para contingencias
- Otro (especifique)

12. ¿Cómo espera que evolucione la industria de la construcción en los próximos 5-10 años?

- Mayor digitalización y automatización
- Mayor uso de materiales sostenibles
- Integración de IA en más procesos
- No se esperan cambios significativos

SECCIÓN 3: TECNOLOGÍAS EN PRESUPUESTOS Y USO DE IA

13. ¿Ha participado en algún proyecto donde se haya implementado IA en presupuestación?

- Sí, y la experiencia fue positiva
- Sí, pero la experiencia no fue satisfactoria
- No, pero estoy interesado en conocer más
- No, y no estoy interesado

14. ¿Qué factores aumentarían su confianza en el uso de IA para presupuestación?

- Casos de éxito demostrados
- Regulaciones claras
- Validaciones externas y auditorías
- Otro (especifique)

15. ¿Ha notado mejoras tangibles en costos y tiempos en proyectos donde se ha aplicado IA?

- Sí, ha habido reducción significativa de costos
- Sí, pero el impacto ha sido moderado
- No, la IA no ha demostrado mejoras
- No tengo información suficiente para responder

16. ¿Qué tipo de soporte o incentivos harían más fácil la adopción de IA en presupuestación?

- Financiamiento gubernamental o subsidios

- Mayor capacitación técnica
- Regulaciones que impulsen su uso
- Otro (especifique)

17. ¿Qué estrategias considera necesarias para superar los desafíos de adopción de IA en presupuestación?

- Incentivos financieros y subsidios
- Capacitación del personal
- Regulaciones más claras
- Otro (especifique)

18. ¿Cuál es el principal desafío para la adopción de IA en presupuestos en su empresa?

- Falta de presupuesto
- Falta de conocimiento técnico
- Falta de herramientas adecuadas
- Resistencia organizacional al cambio
- Otro (especifique)

8.4 Apéndice D: Ficha de Caso de Estudio

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Ficha Caso de Estudio – Aplicada para Categoría B

1. Identificación del Caso

- Nombre del proyecto:
- Objetivo del proyecto:
- Ubicación:
- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial
 - Industrial
 - Otro (especifique): _____
- Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
- Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: _____
 - Fecha de finalización: _____
- Empresas involucradas:

2. Gestión del Costo en el Proyecto

- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?

- Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
- Software especializado
- Integración con modelos BIM
- Otro (especifique): _____

- ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones

3. Evaluación de Resultados

- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos

4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción?

- ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos?

5. Observaciones Adicionales:

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Ficha Caso de Estudio – Aplicada para Categoría C

1. Identificación del Caso

- Nombre de la prueba/experimento:
- Objetivo del experimento:
- Ubicación (si aplica):
- Tipo de prueba:
 - Simulación computacional
 - Implementación piloto
 - Comparación con métodos tradicionales
 - Evaluación en entorno real
 - Otro (especifique): _____
- Año de inicio y finalización:
Fecha de inicio: _____
Fecha de finalización: _____
- Entidades involucradas:

2. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Modelos de Inteligencia Artificial
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 - Sí, hubo variaciones significativas
 - Sí, pero fueron menores

No, los resultados fueron similares

3. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 - Sí, en toda la evaluación
 - Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 - No, pero se hizo un análisis teórico
 - No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 - Reducción del tiempo de estimación
 - Mayor precisión en los costos
 - Reducción de errores manuales
 - No se observó una mejora significativa

4. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 - Sí, los resultados fueron positivos
 - Sí, pero se requieren mejoras
 - No, no hubo beneficios claros

5. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?

- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?

- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?

6. Observaciones Adicionales:

8.5 Apéndice E: Matrices Comparativas

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales

Matriz Comparativa – Aplicada para Categoría B

| Criterio de Comparación | Proyecto 1 | Proyecto 2 | Proyecto 3 | Proyecto 4 | Observaciones |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Nombre del Proyecto | | | | | |
| Ubicación | | | | | |
| Tipo de Proyecto (Infraestructura, Comercial, Residencial, Industrial, etc.) | | | | | |
| Tamaño del Proyecto (USD) | | | | | |
| Método de Presupuestación (Manual, Software, BIM, Otro) | | | | | |
| Desviaciones Presupuestarias (%) (>10%, 5-10%, <5%, No hubo) | | | | | |
| Eficiencia Presupuestaria (Escala 1-5: 1 = Deficiente, 5 = Óptima) | | | | | |
| Precisión en Estimaciones de Costo (Diferencia % entre presupuesto inicial y real) | | | | | |
| Tiempo Promedio de Presupuestación (días) (Antes y después de mejoras en gestión de costos) | | | | | |
| Impacto en Rentabilidad (%) (Cambio en margen de ganancia tras mejoras en costos) | | | | | |
| Factores que Afectaron la Presupuestación (Ej. Problemas en materiales, cambios de diseño, etc.) | | | | | |
| Fuentes de Información (Datos de estudios de caso, entrevistas, encuestas, registros financieros, etc.) | | | | | |
| Principales Lecciones Aprendidas (Mejores prácticas y errores a evitar en gestión de costos) | | | | | |

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Gestión de Proyectos
Maestría en Gestión de Proyectos con Énfasis en Proyectos Empresariales
Matriz Comparativa – Aplicada para Categoría C

| Criterio de Comparación | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Observaciones |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| Nombre de la Prueba/Experimento | | | | | |
| Objetivo del Experimento | | | | | |
| Ubicación <i>(si aplica)</i> | | | | | |
| Tipo de Prueba <i>(Simulación, Implementación Piloto, Comparación Tradicional, Evaluación Real, etc.)</i> | | | | | |
| Método de Presupuestación Analizado <i>(Manual, Software, BIM, IA, Otro)</i> | | | | | |
| Precisión en Estimaciones con IA (%) <i>(Diferencia entre presupuestos tradicionales y con IA)</i> | | | | | |
| Reducción de Tiempos en Presupuestación (días) <i>(Comparación antes y después de IA)</i> | | | | | |
| Impacto en Costos (%) <i>(Ahorro o sobrecostos en la implementación de IA)</i> | | | | | |
| Aceptación de IA por el Equipo <i>(Escala 1-5: 1 = Resistencia total, 5 = Totalmente aceptado)</i> | | | | | |
| Barreras en la Implementación <i>(Costo, Falta de capacitación, Integración con software existente, etc.)</i> tengouna | | | | | |
| Resultados Claves <i>(Beneficios, Desafíos, Impacto real en presupuestación con IA)</i> | | | | | |
| Fuentes de Información <i>(Datos de experimentos, entrevistas, encuestas, reportes financieros, etc.)</i> | | | | | |
| Lecciones Aprendidas <i>(Buenas prácticas y recomendaciones para implementación de IA en presupuestación)</i> | | | | | |

8.6 Apéndice F: Fichas bibliográficas completadas

Ficha Bibliográfica #1

- **Fecha:** 2020
- **Título del documento:** The importance and necessity of cost management of construction projects
- **Autor(es):** Bardu, A.-M., & Sandu, M.
- **Fuente:** Urbanism. Arhitectură. Construcții, 11(2), 215–224.
- **Resumen:** El artículo analiza la importancia de la gestión de costos en los proyectos de construcción, destacando cómo un control deficiente de los costos puede afectar negativamente la ejecución del proyecto. Se revisan los principales factores que inciden en la desviación de costos, la necesidad de planificación temprana, la actualización continua de presupuestos y la integración de la gestión de costos dentro de la planificación estratégica del proyecto. Se resalta que la gestión de costos no debe considerarse una actividad aislada, sino un proceso dinámico vinculado con la calidad, el tiempo y el alcance del proyecto.
- **Palabras clave:** Gestión de costos, proyectos de construcción, control financiero, planificación estratégica.
- **Categoría de análisis:** Categoría A (Proyectos de construcción) y Categoría B (Gestión de costos).
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente es relevante ya que proporciona una base teórica sólida sobre los principales desafíos en los proyectos de construcción relacionados con la gestión de costos (Categoría A), y también aborda prácticas de eficiencia presupuestaria y control de costos estratégicos (Categoría B).
- **Citas destacadas:**
 - “Cost management is essential for ensuring that the project remains financially viable throughout its lifecycle.” (**Desafío en proyectos de construcción - Categoría A**).
 - “Cost control should be integrated with the strategic planning process to anticipate deviations and optimize resource use.” (**Eficiencia presupuestaria y control de costos - Categoría B**).
- **Notas adicionales:**
 - Este documento contribuye parcialmente a la Categoría A al abordar el desafío del control de costos como factor crítico en el éxito de proyectos de construcción.
 - Además, aporta de forma completa a la Categoría B, proporcionando fundamentos sobre la eficiencia y gestión estratégica de costos en proyectos de construcción.

Ficha Bibliográfica #2

- **Fecha:** 2023
- **Título del documento:** Procedimiento para el control de costos y plazos en la gestión de proyectos en la fase de ejecución. Caso gobiernos autónomos municipales de Cochabamba-Bolivia.
- **Autor(es):** Guzmán Sánchez, J. C.
- **Fuente:** Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(2), 7357–7356. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5885
- **Resumen:** El estudio analiza los principales desafíos en la gestión de proyectos de infraestructura pública, enfocándose en los problemas de control de costos y plazos durante la fase de ejecución. Propone un procedimiento metodológico para mejorar el seguimiento de los proyectos, basándose en la necesidad de fortalecer la planificación, el control financiero y la toma de decisiones oportunas. El artículo evidencia cómo

la ausencia de herramientas adecuadas y la falta de procedimientos estandarizados afectan negativamente los resultados de los proyectos de construcción pública.

- **Palabras clave:** Gestión de proyectos, control de costos, control de plazos, proyectos públicos, planificación de obras.
- **Categoría de análisis:** Categoría A – Proyectos de construcción.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente aporta evidencia empírica sobre los principales desafíos en la ejecución de proyectos de construcción (especialmente públicos), resaltando la necesidad de implementar procedimientos de control más robustos y sistemáticos. Además, aunque no plantea tendencias innovadoras, refuerza la importancia de aplicar metodologías estandarizadas para mejorar la calidad de los proyectos, lo que se alinea con el diagnóstico de necesidades de la Categoría A.
- **Citas destacadas:**
 - “La deficiencia en el control de costos y plazos impacta directamente en la calidad final de los proyectos de construcción.” (**Desafío en proyectos de ejecución**).
 - “Se requiere el diseño de procedimientos metodológicos que garanticen la correcta planificación y ejecución de obras públicas.” (**Necesidad identificada en la gestión de proyectos**).
- **Notas adicionales:**
 - Este documento se utiliza principalmente para analizar **desafíos** relacionados con la mala ejecución de proyectos públicos y **necesidades** de fortalecer procesos de control y planificación en proyectos de construcción.
 - No aborda tendencias futuras de manera explícita, pero refuerza la importancia de procedimientos sistemáticos en la gestión de proyectos.

Ficha Bibliográfica #3

- **Fecha:** 2023
- **Título del documento:** Impacto de la metodología BIM en la gestión de proyectos de construcción
- **Autor(es):** Gómez-Valdés, M., Acevedo-Acevedo, S., Alvarado-Acuña, L., & Iturra-Molina, R.
- **Fuente:** Revista Tecnología en Marcha. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i7.6860>
- **Resumen:** El artículo analiza la influencia de la metodología BIM (*Building Information Modeling*) en la gestión de proyectos de construcción, destacando los principales retos para su implementación efectiva. Se identifican desafíos relacionados con la resistencia al cambio cultural, la necesidad de capacitación especializada y la falta de infraestructura tecnológica adecuada. Además, se discuten las oportunidades que ofrece BIM para mejorar la colaboración entre actores del proyecto, la eficiencia en la toma de decisiones y el control de costos y tiempos. Se proyecta la tendencia hacia la integración total de BIM en todas las fases de los proyectos de construcción como parte de la transformación digital del sector.
- **Palabras clave:** BIM, gestión de proyectos, transformación digital, colaboración en construcción, innovación tecnológica.
- **Categoría de análisis:** Categoría A – Proyectos de construcción.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente es altamente relevante ya que aborda desafíos actuales en la gestión de proyectos de construcción (resistencia cultural, falta de capacitación e infraestructura), identifica necesidades clave (adopción tecnológica y formación especializada) y presenta tendencias claras (digitalización progresiva mediante BIM), cubriendo así los tres ejes principales definidos para la Categoría A.

- **Citas destacadas:**
 - “Uno de los principales retos para la adopción de BIM es la resistencia cultural de las organizaciones tradicionales de construcción.” (**Desafío en la gestión de proyectos de construcción**).
 - “La formación de profesionales capacitados en el uso de BIM es una necesidad imperante para el éxito de los proyectos.” (**Necesidad prioritaria en proyectos de construcción**).
 - “BIM se perfila como la base de la transformación digital en la gestión integral de proyectos de construcción.” (**Tendencia hacia la digitalización del sector**).
- **Notas adicionales:**
 - Este documento contribuye directamente al análisis de **desafíos, necesidades y tendencias** en proyectos de construcción dentro de la Categoría A.
 - Es particularmente valioso para identificar cambios estructurales requeridos en la industria costarricense.

Ficha Bibliográfica #4

- **Fecha:** 2012
- **Título del documento:** Beyond the Iron Triangle: Year Zero
- **Autor(es):** Caccamese, A., & Bragantini, D.
- **Fuente:** PMI Global Congress Proceedings, Marseille, Francia.
Disponible en: <https://www.pmi.org/learning/library/beyond-iron-triangle-year-zero-6381>
- **Resumen:** El documento cuestiona la tradicional concepción del éxito en proyectos basada únicamente en el "triángulo de hierro" (costo, tiempo y calidad), argumentando que los proyectos de construcción modernos enfrentan desafíos más complejos que requieren un enfoque más holístico. Se destaca la necesidad de considerar factores como el impacto social, la sostenibilidad, el valor estratégico generado y la satisfacción de los stakeholders. Asimismo, se identifican tendencias emergentes en gestión de proyectos que impulsan una redefinición de los criterios de éxito, haciendo énfasis en enfoques más dinámicos e integradores.
- **Palabras clave:** Gestión de proyectos, criterios de éxito, sostenibilidad, valor estratégico, *stakeholders*.
- **Categoría de análisis:** Categoría A – Proyectos de construcción.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente es sumamente relevante para la Categoría A, ya que plantea desafíos conceptuales para la gestión de proyectos de construcción, identifica nuevas necesidades (incorporar dimensiones como sostenibilidad e impacto social) y describe tendencias futuras en la forma de evaluar el éxito de los proyectos.
- **Citas destacadas:**
 - “Project success must move beyond meeting budget, schedule, and quality requirements, embracing stakeholder satisfaction and strategic value creation.” (**Necesidad de redefinir criterios de éxito en proyectos de construcción**).
 - “The sustainability of the results and the social acceptability of the project are becoming new parameters of project success.” (**Tendencias hacia sostenibilidad y responsabilidad social en construcción**).
- **Notas adicionales:**

- Este documento resulta fundamental para analizar **desafíos** en la redefinición de éxito en proyectos, **necesidades** de enfoque integral y **tendencias** hacia sostenibilidad y valor en la gestión de proyectos de construcción.

Ficha Bibliográfica #5

- **Fecha:** 2022
- **Título del documento:** The Role of Construction Cost Management Practices on Construction Organisations' Strategic Performance
- **Autor(es):** Okereke, R. A., Zakariyau, M., & Eze, E.
- **Fuente:** Journal of Project Management Practice, 2(1), 20–39. <https://doi.org/10.22452/jpmp.vol2no1.2>
- **Resumen:** El artículo analiza el impacto de las prácticas de gestión de costos de construcción sobre el desempeño estratégico de las organizaciones del sector. Los autores plantean que una adecuada gestión de costos no solo contribuye a cumplir objetivos de proyecto (costo, tiempo, calidad), sino que también fortalece la competitividad organizacional a largo plazo. Se destacan elementos críticos como la planificación detallada de costos, el monitoreo continuo, la precisión en la presupuestación y el control riguroso durante la ejecución. Además, se examinan los factores internos y externos que influyen en la eficiencia de la gestión de costos.
- **Palabras clave:** Gestión de costos, eficiencia presupuestaria, desempeño estratégico, construcción, control de costos.
- **Categoría de análisis:** Categoría B – Gestión de costos.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente resulta altamente relevante para Categoría B, ya que aborda de manera integral el alcance de la gestión de costos en proyectos de construcción, los mecanismos que inciden en su eficiencia, y la importancia de la precisión presupuestaria como factor estratégico. Refuerza los tres ejes de análisis definidos en la investigación.
- **Citas destacadas:**
 - “Effective cost management practices significantly enhance project outcomes and organisational strategic objectives.” (**Relación entre gestión de costos y desempeño estratégico**).
 - “The accuracy of project cost estimates is directly linked to project success and client satisfaction.” (**Importancia de la precisión presupuestaria**).
- **Notas adicionales:**
 - El artículo se basa en un enfoque cuantitativo aplicado a organizaciones del sector construcción, lo cual aporta evidencia empírica reciente.
 - Aporta ejemplos y buenas prácticas que podrían ser útiles para contextualizar los hallazgos de entrevistas y encuestas en esta investigación.

Ficha Bibliográfica #6

- **Fecha:** 2023
- **Título del documento:** Procedimiento para el control de costos y plazos en la gestión de proyectos en la fase de ejecución. Caso gobiernos autónomos municipales de Cochabamba-Bolivia.
- **Autor(es):** Guzmán Sánchez, J. C.
- **Fuente:** Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(2), 7357–7356. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5885

- **Resumen:** El artículo presenta un procedimiento metodológico para mejorar el control de costos y plazos durante la fase de ejecución de proyectos de infraestructura pública. Analiza las deficiencias comunes en la planificación y el monitoreo de costos, proponiendo acciones concretas para fortalecer la gestión financiera de los proyectos. El estudio destaca la importancia de contar con procesos estandarizados, instrumentos de control efectivos y sistemas de seguimiento en tiempo real para optimizar la eficiencia y la precisión presupuestaria.
- **Palabras clave:** Control de costos, eficiencia presupuestaria, proyectos de infraestructura, gestión de plazos, monitoreo de proyectos.
- **Categoría de análisis:** Categoría B – Gestión de costos.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente contribuye directamente a las subcategorías de la Categoría B:
 - **B1.1 Alcance de la gestión de costos:** Define la necesidad de ampliar la gestión de costos a procedimientos estructurados de control durante la ejecución.
 - **B1.2 Eficiencia presupuestaria:** Propone medidas prácticas para optimizar el control de costos y mejorar la eficiencia en la ejecución presupuestaria.
 - **B1.3 Precisión presupuestaria:** Plantea la importancia de sistemas de seguimiento y verificación continua para garantizar la exactitud de los costos planificados versus los reales.
- **Citas destacadas:**
 - “El control sistemático de costos y plazos es fundamental para garantizar la calidad y eficiencia de los proyectos de infraestructura pública.” (**Refuerzo a la eficiencia presupuestaria y control de alcance**).
 - “La falta de procedimientos de seguimiento impacta negativamente en la precisión de los presupuestos iniciales.” (**Relación con la precisión presupuestaria**).
- **Notas adicionales:**
 - Aunque el estudio se centra en proyectos públicos, los principios de control de costos y eficiencia presupuestaria son extrapolables a proyectos de construcción en general.
 - Complementa de forma práctica el análisis de las entrevistas al mostrar la aplicación real de métodos de control presupuestario.

Ficha Bibliográfica #7

- **Fecha:** 2011
- **Título del documento:** Gestión de Costos en los Proyectos: Un abordaje teórico desde las mejores prácticas del Project Management Institute
- **Autor(es):** Villegas, M. Á., & Rincón de Parra, H. C.
- **Fuente:** Visión Gerencial, 1, 85–94.
- **Resumen:** El artículo analiza la gestión de costos en proyectos desde la perspectiva de las mejores prácticas del PMI (Project Management Institute). Se describen los procesos fundamentales de la gestión de costos — planificación, estimación, presupuestación y control— y su importancia para lograr un desempeño efectivo del proyecto. El documento enfatiza la necesidad de mantener la trazabilidad de los costos a lo largo del ciclo de vida del proyecto y presenta conceptos como la línea base de costos y el valor ganado como herramientas críticas para mejorar la eficiencia y la precisión presupuestaria.
- **Palabras clave:** Gestión de costos, línea base de costos, valor ganado, PMI, control presupuestario.

- **Categoría de análisis:** Categoría B – Gestión de costos.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente se vincula directamente con las subcategorías de la Categoría B:
 - **B1.1 Alcance de la gestión de costos:** Aborda integralmente los procesos de gestión de costos en todas las fases del proyecto, desde la planificación hasta el control.
 - **B1.2 Eficiencia presupuestaria:** Propone el uso de herramientas como el valor ganado para mejorar la eficiencia en la gestión de recursos financieros.
 - **B1.3 Precisión presupuestaria:** Destaca la importancia de establecer una línea base de costos precisa y realizar mediciones continuas para asegurar la exactitud de las proyecciones presupuestarias.
- **Citas destacadas:**
 - “El uso del valor ganado permite evaluar objetivamente el desempeño del proyecto en relación con los costos y plazos planeados.” (**Apoyo a la eficiencia y precisión presupuestaria**).
 - “La línea base de costos constituye el estándar contra el cual se mide el desempeño real del proyecto.” (**Fundamento para el control y precisión de costos**).
- **Notas adicionales:**
 - La estructura metodológica propuesta se alinea con los principios internacionales del PMI, lo que aporta un marco de referencia sólido y reconocido globalmente para el análisis de gestión de costos en proyectos de construcción.

Ficha Bibliográfica #8

- **Fecha:** 2024
- **Título del documento:** *Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review*
- **Autor(es):** Datta, S. D., Islam, M., Rahman Sobuz, Md. H., Ahmed, S., & Kar, M.
- **Fuente:** *Heliyon*, 10(5), e26888. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>
- **Resumen:** El artículo presenta una revisión sistemática de investigaciones recientes sobre la aplicación de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) en las distintas etapas del ciclo de vida de proyectos de construcción. Identifica los algoritmos más utilizados, sus funciones específicas, beneficios asociados y principales barreras técnicas y organizacionales. El texto concluye con recomendaciones para facilitar la adopción tecnológica en el sector.
- **Palabras clave:** Inteligencia artificial, aprendizaje automático, construcción, presupuestación, algoritmos, adopción tecnológica, barreras.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategorías cubiertas:
 - **C1.1 Tipología de IA existente:** Se clasifican técnicas como aprendizaje supervisado, árboles de decisión, redes neuronales y algoritmos de regresión, aplicados específicamente a estimaciones de costos en construcción (pp. 5–6).
 - **C1.2 Beneficios y limitaciones:** Se reportan mejoras en eficiencia, reducción de errores humanos y agilidad en presupuestación. Como limitaciones se identifican la falta de datos estructurados, interoperabilidad limitada y desconfianza de usuarios (pp. 8–10).

- **C1.3 Estrategias de implementación:** El artículo propone una implementación gradual, uso combinado con BIM, mejora de calidad de datos y capacitación como mecanismos clave para superar las barreras actuales (pp. 11–12).
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente es fundamental para la Categoría C porque ofrece una visión técnica y estratégica de la IA aplicada a presupuestación en construcción. Aporta una clasificación actualizada de tecnologías (C1.1), una evaluación crítica de beneficios y obstáculos (C1.2), y propuestas prácticas de adopción tecnológica (C1.3), todo basado en evidencia reciente y global. Además, refuerza los objetivos de la investigación al conectar tendencias tecnológicas con procesos de toma de decisiones en presupuestación.
- **Citas destacadas:**
 - “Supervised learning techniques such as decision trees, random forest, and support vector machines have been widely adopted for construction cost estimation tasks.” (p. 6)
 - “Key implementation challenges include lack of structured data, interoperability issues with legacy systems, and a general lack of trust in AI outputs among practitioners.” (p. 10)
- **Notas adicionales:**
 - Es una de las fuentes más actuales del estado del arte en IA aplicada a la construcción.
 - Sugiere una hoja de ruta escalonada para la integración tecnológica, altamente aplicable a proyectos en entornos latinoamericanos.

Ficha Bibliográfica #9

- **Fecha:** 2021
- **Título del documento:** *Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges*
- **Autor(es):** Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O., & Ahmed, A.
- **Fuente:** *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>
- **Resumen:** Este artículo realiza una revisión exhaustiva del estado actual de la inteligencia artificial en la industria de la construcción. Abarca las aplicaciones principales de la IA, los tipos de tecnologías empleadas, los beneficios observados y los desafíos para su adopción. Los autores analizan el potencial transformador de la IA en áreas como diseño, planificación, presupuestación, control de calidad y gestión del ciclo de vida de los activos. También proponen líneas de investigación futura y estrategias para superar barreras actuales.
- **Palabras clave:** Inteligencia artificial, construcción, estimación de costos, beneficios, barreras, digitalización.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategorías cubiertas:
 - **C1.1 Tipología de IA existente:** Se describe una tipología detallada de aplicaciones de IA, incluyendo redes neuronales, algoritmos genéticos, *deep learning* y técnicas de NLP, vinculadas con la estimación de costos y procesos de construcción.
 - **C1.2 Beneficios y limitaciones:** Se identifican beneficios como automatización de tareas repetitivas, mayor precisión en presupuestos y reducción de tiempos. Entre las limitaciones destacan la escasez de datos estandarizados, resistencia del personal y falta de regulación.

- **C1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas:** El artículo presenta recomendaciones concretas para superar barreras, incluyendo inversión en capacitación, integración progresiva con sistemas BIM y generación de confianza institucional.
- **Relevancia para la investigación:** Este documento aporta un marco teórico completo sobre la aplicación de IA en el sector construcción, con énfasis en procesos de estimación y control. Provee clasificaciones útiles para identificar tecnologías aplicadas (C1.1), discute ampliamente los beneficios y limitaciones (C1.2), y propone prácticas sostenibles para fomentar una adopción más fluida (C1.4). Su enfoque estratégico refuerza el análisis de tendencias y estrategias de implementación para proyectos de presupuestación.
- **Citas destacadas:**
 - “AI-based cost estimation systems have demonstrated higher accuracy than traditional models, particularly when trained with sufficient project data.” (p. 11)
 - “Resistance to AI adoption often stems from low digital literacy and a fear of workforce displacement.” (p. 13)
- **Notas adicionales:**
 - La fuente ofrece una perspectiva global pero aplicable al contexto latinoamericano, especialmente en desafíos culturales y estructurales.
 - Refuerza el análisis del marco metodológico al conectar beneficios observables con recomendaciones prácticas de implementación.

Ficha Bibliográfica #10

- **Fecha:** 2022
- **Título del documento:** *Una revisión sobre el rol de la inteligencia artificial en la industria de la construcción*
- **Autor(es):** Mendoza, J. G., Quispe, M. B., & Muñoz, S. P.
- **Fuente:** *Ingeniería y Competitividad*, 24(2). <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i2.11406>
- **Resumen:** Este artículo realiza una revisión del estado de la inteligencia artificial en la industria de la construcción, con especial atención al contexto latinoamericano. Se identifican las principales tecnologías utilizadas, beneficios esperados, barreras culturales y económicas, así como propuestas para su adopción progresiva. Además, se examinan estudios de caso de implementaciones fallidas y exitosas, destacando factores clave como la disponibilidad de datos, la preparación del personal técnico y el compromiso institucional.
- **Palabras clave:** Inteligencia artificial, construcción, Latinoamérica, presupuestación, implementación, riesgos, lecciones aprendidas.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategorías cubiertas:
 - **C1.1 Tipología de IA existente:** Se revisan tecnologías aplicadas como redes neuronales artificiales, algoritmos predictivos y visión por computadora, aplicadas a procesos de presupuestación y control de obra.
 - **C1.2 Beneficios y limitaciones:** Se describen beneficios como automatización, reducción de tiempos y mejor toma de decisiones, así como limitaciones relacionadas con falta de datos locales, resistencia cultural y bajo presupuesto para innovación.

- **C1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas:** Se destacan experiencias de países latinoamericanos, señalando prácticas exitosas como la capacitación cruzada, integración de IA con BIM y validación constante de resultados por parte de equipos humanos.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente es particularmente valiosa por su enfoque en el contexto latinoamericano, similar al caso de Costa Rica. Aporta descripciones concretas de tecnologías (C1.1), evidencia de beneficios reales y obstáculos culturales (C1.2), y aprendizajes obtenidos en implementaciones locales (C1.4). Su perspectiva práctica fortalece el análisis de campo de la tesis, permitiendo contrastar datos bibliográficos con los resultados de entrevistas y encuestas.
- **Citas destacadas:**
 - “Uno de los mayores desafíos en Latinoamérica es la escasa inversión en tecnologías inteligentes y la poca cultura digital en las empresas constructoras.” (p. 5)
 - “La validación de resultados generados por IA por parte de ingenieros experimentados es una práctica clave para aumentar la confianza en su uso.” (p. 7)
- **Notas adicionales:**
 - La revisión incluye un análisis de madurez digital en diferentes países de la región.
 - Su contenido complementa las recomendaciones globales con un enfoque más aterrizado a la realidad de países en desarrollo.

Ficha Bibliográfica #11

- **Fecha:** 2022
- **Título del documento:** *Acceptance Model of Artificial Intelligence (AI)-Based Technologies in Construction Firms: Applying the Technology Acceptance Model (TAM) in Combination with the Technology–Organisation–Environment (TOE) Framework*
- **Autor(es):** Na, S., Heo, S., Han, S., Shin, Y., & Roh, Y.
- **Fuente:** *Buildings*, 12(2), 90. <https://doi.org/10.3390/buildings12020090>
- **Resumen:** Este estudio propone un modelo para evaluar la aceptación de tecnologías basadas en inteligencia artificial en empresas de construcción, utilizando un enfoque combinado TAM–TOE. La investigación identifica factores determinantes para la adopción exitosa de IA, considerando elementos tecnológicos, organizacionales y del entorno. Se aplicó un análisis empírico en empresas constructoras, evaluando percepciones sobre facilidad de uso, utilidad percibida, apoyo directivo, infraestructura y competitividad.
- **Palabras clave:** Tecnología, aceptación, adopción, inteligencia artificial, construcción, modelo TAM, modelo TOE, estrategias de implementación.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategoría cubierta:
 - **C1.3 Estrategias de implementación:** El artículo analiza los factores que inciden en la adopción de IA en empresas constructoras, destacando como estrategias clave el liderazgo organizacional, la compatibilidad tecnológica con procesos existentes, el soporte técnico, la presión competitiva del entorno y la percepción de utilidad. Propone una hoja de ruta para orientar la implementación de tecnologías basadas en IA.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente aporta un marco estructurado para entender cómo se implementan tecnologías de IA en contextos empresariales de la construcción. Brinda herramientas conceptuales que permiten analizar la toma de decisiones sobre presupuestación asistida por IA y sugiere estrategias prácticas de adopción gradual. Refuerza directamente la subcategoría C1.3 con base empírica sólida y aplicable tanto a contextos desarrollados como en vías de desarrollo.

- **Citas destacadas:**
 - “Top management support and perceived compatibility of AI systems with existing workflows are among the strongest predictors of successful adoption.” (p. 12)
 - “External pressure from clients and market competition plays a significant role in the organizational decision to implement AI.” (p. 13)
- **Notas adicionales:**
 - Puede complementarse con otras fuentes más centradas en presupuestación, ya que esta fuente se enfoca en adopción tecnológica en general.
 - El modelo TAM–TOE puede integrarse al marco analítico de la tesis como referencia para contrastar hallazgos empíricos.

Ficha Bibliográfica #12

- **Fecha:** 2023
- **Título del documento:** *Integrating Building Information Modelling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) for Smart Construction Schedule, Cost, Quality, and Safety Management: Challenges and Opportunities*
- **Autor(es):** Rane, N.
- **Fuente:** *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4616055>
- **Resumen:** Este artículo revisa las oportunidades y desafíos de integrar BIM con IA en la gestión de cronogramas, costos, calidad y seguridad en proyectos de construcción. Se destacan los beneficios de la integración técnica, las condiciones necesarias para su adopción exitosa y los cambios que implica a nivel organizacional. La propuesta se enfoca en construir un entorno colaborativo y digitalizado, donde los flujos de datos permitan mejorar la toma de decisiones en tiempo real, especialmente en procesos críticos como la presupuestación.
- **Palabras clave:** BIM, inteligencia artificial, integración, gestión de costos, implementación, digitalización.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategoría cubierta:
 - **C1.3 Estrategias de implementación:** La fuente propone estrategias prácticas para implementar IA a través de su integración con BIM, tales como fases de adopción progresiva, inversión en interoperabilidad, uso de estándares abiertos, capacitación especializada y diseño de pilotos controlados. Además, resalta la necesidad de apoyo institucional y gobernanza de datos para asegurar resultados sostenibles.
- **Relevancia para la investigación:** Este documento aporta una visión estratégica sobre cómo implementar la IA en procesos presupuestarios dentro de un entorno BIM, lo que resulta directamente útil para proyectos que buscan combinar eficiencia tecnológica con metodologías de trabajo colaborativo. Reforzando la subcategoría C1.3, esta fuente ofrece ejemplos aplicables a la realidad constructiva, tanto en países desarrollados como en regiones en transición tecnológica.
- **Citas destacadas:**
 - “Progressive implementation of AI through BIM integration can mitigate resistance and facilitate smoother organizational transition.” (p. 6)
 - “Lack of standardized protocols and low digital maturity are major bottlenecks in implementing AI-enabled BIM systems in construction.” (p. 8)
- **Notas adicionales:**

- Es una fuente altamente aplicable a contextos donde la digitalización aún se encuentra en fases iniciales.
- Puede relacionarse con estrategias propuestas en entrevistas y encuestas del estudio para validar hallazgos prácticos.

Ficha Bibliográfica #13

- **Fecha:** 2022
- **Título del documento:** *Machine Learning Algorithms for Construction Cost Prediction: A Systematic Review*
- **Autor(es):** Abed, Y., Hasan, T., Zehawi, R., & Maseer, Z.
- **Fuente:** [Revista no especificada en el documento]
- **Resumen:** El artículo presenta una revisión sistemática sobre el uso de algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) aplicados a la predicción de costos en construcción. Se analizan 60 artículos seleccionados, clasificando los algoritmos utilizados, los contextos de aplicación, los resultados obtenidos y las condiciones necesarias para su implementación. Los autores enfatizan la necesidad de estrategias de adopción progresiva y calidad en los datos para mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos de IA aplicados al presupuesto.
- **Palabras clave:** Aprendizaje automático, construcción, estimación de costos, revisión sistemática, implementación, predicción.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategoría cubierta:
 - **C1.3 Estrategias de implementación:** A partir del análisis de literatura, se proponen estrategias clave como la selección adecuada de algoritmos según el tipo de proyecto, la normalización de datos de entrada, la validación cruzada de modelos, y la formación de equipos técnicos interdisciplinarios. Además, se recomienda iniciar con pruebas piloto controladas antes de escalar la solución IA a toda la organización.
- **Relevancia para la investigación:** Este artículo resulta altamente relevante para fortalecer la subcategoría C1.3, ya que proporciona estrategias detalladas de implementación de IA específicamente enfocadas en presupuestación. La sistematización de más de 60 estudios permite identificar patrones, buenas prácticas técnicas y barreras comunes, aportando una base empírica sólida para contrastar con hallazgos del estudio de campo de esta investigación.
- **Citas destacadas:**
 - “Successful implementation depends on the availability of clean, structured, and sufficient data sets tailored to the project type.” (p. 6)
 - “A phased approach is recommended, starting with simple supervised algorithms and scaling up as model performance improves.” (p. 7)
- **Notas adicionales:**
 - El estudio enfatiza aspectos técnicos, pero también incluye recomendaciones organizacionales.
 - Puede complementarse con fuentes como Na (2022) y Rane (2023) para ofrecer una visión integral técnica–organizacional.

Ficha Bibliográfica #14

- **Fecha:** 2023

- **Título del documento:** *Crafting an Automated Algorithm for Estimating the Quantity of Beam Rebar*
- **Autor(es):** Widjaja, D. D., Kim, D.-Y., & Kim, S.
- **Fuente:** *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 23(4), 485–496. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2023.23.4.485>
- **Resumen:** El artículo presenta el desarrollo y validación de un algoritmo automatizado para estimar la cantidad de acero de refuerzo (rebar) en vigas de concreto, aplicando técnicas de inteligencia artificial y procesamiento automatizado de planos. El estudio aborda el diseño del modelo, su integración con software de modelado y los resultados de precisión obtenidos al comparar estimaciones tradicionales con las generadas por el algoritmo. También se discuten aprendizajes obtenidos durante la implementación.
- **Palabras clave:** Estimación automatizada, acero de refuerzo, IA, buenas prácticas, precisión, algoritmos, presupuestación.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategoría cubierta:
 - **C1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas:** La fuente documenta un caso aplicado de implementación exitosa de IA en procesos de presupuestación. Identifica factores clave de éxito como: validación constante de resultados, colaboración entre desarrolladores y estimadores, y ajustes iterativos al algoritmo. Además, destaca lecciones como la necesidad de traducir reglas constructivas humanas en criterios computables y de evitar la automatización completa sin revisión técnica.
- **Relevancia para la investigación:** Este caso práctico constituye una fuente directa para el análisis de buenas prácticas en la implementación de IA aplicada a presupuestación. Brinda evidencia concreta de cómo un modelo puede ser adoptado progresivamente, validado en campo y refinado según las condiciones del proyecto. La experiencia relatada ofrece insumos valiosos para contrastar con hallazgos empíricos de entrevistas y encuestas, especialmente sobre confianza, validación técnica y participación interdisciplinaria.
- **Citas destacadas:**
 - “Field engineers were involved in reviewing the algorithm’s logic to ensure practical alignment with construction standards.” (p. 492)
 - “Rather than replacing manual estimation, the algorithm was designed to support and accelerate decision-making.” (p. 494)
- **Notas adicionales:**
 - Aporta un enfoque complementario al de fuentes más teóricas, al basarse en experiencia aplicada.
 - El artículo incluye gráficos comparativos entre resultados estimados por IA y los calculados manualmente.

Ficha Bibliográfica #8 – Categoría C

- **Fecha:** 2024
- **Título del documento:** *Artificial intelligence in infrastructure construction: A critical review*
- **Autor(es):** Chen, K., Zhou, X., Bao, Z., Skibniewski, M. J., & Fang, W.
- **Fuente:** *Frontiers of Engineering Management*. <https://doi.org/10.1007/s42524-024-3128-5>
- **Resumen:** Este artículo ofrece una revisión crítica sobre la adopción de inteligencia artificial en proyectos de infraestructura. Analiza su aplicación en diversas etapas del ciclo de vida, incluyendo diseño, construcción y mantenimiento. También identifica factores críticos de éxito, desafíos técnicos, implicaciones éticas y

lecciones aprendidas derivadas de implementaciones reales. Se presentan varios casos documentados de adopción de IA en megaproyectos, con énfasis en presupuestación, logística, y gestión de activos.

- **Palabras clave:** Infraestructura, inteligencia artificial, lecciones aprendidas, construcción, presupuestación, adopción tecnológica.
- **Categoría de análisis:** Categoría C – Inteligencia Artificial
Subcategoría cubierta:
 - **C1.4 Buenas prácticas y lecciones aprendidas:** La fuente presenta hallazgos clave derivados de experiencias reales en proyectos de infraestructura que han integrado IA. Entre las lecciones destacadas se incluyen: la importancia de la interoperabilidad entre plataformas, la necesidad de estándares de datos abiertos, la inclusión temprana de usuarios finales en el diseño del sistema y el diseño de ciclos de prueba progresivos. También se detallan prácticas que no funcionaron, aportando una visión realista de los riesgos.
- **Relevancia para la investigación:** Esta fuente aporta evidencia contrastable con los hallazgos empíricos del estudio, especialmente en torno a lo que funciona y no funciona al implementar IA en entornos complejos como la construcción de infraestructura. Refuerza el análisis de C1.4 al proporcionar experiencias documentadas con resultados tangibles, errores cometidos, ajustes implementados y recomendaciones que pueden ser útiles para orientar futuras estrategias en presupuestación con IA.
- **Citas destacadas:**
 - “Successful AI adoption requires not only technical readiness but also organizational maturity and data culture.” (p. 6)
 - “Lessons from failed projects show that lack of stakeholder engagement and unrealistic expectations often derail implementation.” (p. 8)
- **Notas adicionales:**
 - Puede relacionarse con entrevistas en las que se reporta escepticismo sobre la IA.
 - Aporta ejemplos comparativos que pueden enriquecer el apartado de análisis en el capítulo 5 o en las recomendaciones.

8.7 Apéndice G: Síntesis de los resultados de las entrevistas

Cuadro 8.1. Entrevistado 1.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo | Presupuestista senior |
| Años de experiencia | 10 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Usa herramientas digitales, pero no completamente automatizadas. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. Solo ha usado ChatGPT para consultas generales, sin implementación formal. |
| Uso de IA en su organización | No. No se ha implementado IA en procesos de presupuestación. |
| Principales desafíos actuales | Gestión del presupuesto y cronograma, falta de integración y comunicación. |
| Errores comunes en proyectos | Falta de comprensión real del alcance y deficiencia en lectura de planos. |
| Necesidades prioritarias | Mejor comunicación entre equipos, integración con otras áreas, capacitación. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí, mediante capacitaciones constantes. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Considera que puede optimizar recursos, reducir errores y tiempos. |
| Reemplazo del estimador humano | No. La IA es una herramienta de apoyo, pero no puede sustituir la experiencia humana. |
| Obstáculos para implementación de IA | Falta de software especializado, altos costos y resistencia al cambio. |
| Medidas necesarias para adopción | Software confiable, respaldo técnico, buena capacitación. |
| Impacto esperado en 5 años | No prevé grandes cambios inmediatos; cree que el proceso será lento. |
| Estrategias recomendadas | Capacitación constante y generar confianza en las herramientas. |
| Tipo de formación recomendada | Entrenamiento técnico sobre las herramientas y comprensión básica de IA. |
| Comentario final | Cree que la IA es positiva, pero se debe tener cuidado con su uso excesivo o sin supervisión. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.2. Entrevistado 2.

| Tema | Resumen |
|---|--|
| Cargo | Presupuestista junior |
| Años de experiencia | 5 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza herramientas como Estimating EDGE y AutoCAD para el proceso de presupuestación. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. No ha utilizado IA directamente y su empresa no la ha implementado. |
| Uso de IA en su organización | No. La empresa no ha considerado su implementación formal. |
| Principales desafíos actuales | Gestión del costo y equilibrio entre vida personal y trabajo. |
| Errores comunes en proyectos | Falta de tiempo para planificar y ejecutar presupuestos; poca integración de procesos. |
| Necesidades prioritarias | Digitalización, mayor capacitación del personal y mejor gestión del costo. |
| Mecanismo de mejora continua | Existen capacitaciones informales y aprendizaje colaborativo entre compañeros. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Alto. Puede ayudar en control y revisión de procesos. |
| Reemplazo del estimador humano | No. La IA es una herramienta de apoyo, pero no un reemplazo. |
| Obstáculos para implementación de IA | Desconfianza, resistencia al cambio y hábitos arraigados. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación para todo el personal. |
| Impacto esperado en 5 años | Bajo en Costa Rica; mayor impacto en países más desarrollados. |
| Estrategias recomendadas | Comprender los datos que se suministran a la IA, capacitar, formar equipos dedicados, y estandarizar procesos. |
| Tipo de formación recomendada | Técnica. |
| Comentario final | El cambio debe ser cultural, no solo tecnológico. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.3. Entrevistado 3.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo | Gerente de licitaciones |
| Años de experiencia | 10 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza Planswift y Sage Estimating, con revisión manual de especificaciones y consultas técnicas. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. No ha participado en su implementación ni la empresa la ha considerado aún. |
| Uso de IA en su organización | No. No se utiliza ni se ha explorado aún. |
| Principales desafíos actuales | Comunicación entre los actores del proyecto, falta de planificación detallada y estandarización de procesos, así como gestión del costo. |
| Errores comunes en proyectos | Falta de comprensión del alcance total, desconocimiento técnico en gestión de proyectos y construcción. |
| Necesidades prioritarias | Implementación de nuevas tecnologías, mejora en la comunicación, y definición de procedimientos claros. |
| Mecanismo de mejora continua | Implementación de nuevas tecnologías, mejora en la comunicación, y definición de procedimientos claros. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Alto, ayudar a ser más eficientes y precisos. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Cree que el rol evolucionará hacia validación y uso estratégico de herramientas IA, pero no desaparecerá. |
| Obstáculos para implementación de IA | Cultura organizacional conservadora, falta de alineación entre niveles jerárquicos. |
| Medidas necesarias para adopción | Estrategia organizacional clara, liderazgo técnico capacitado y fondos asignados. |
| Impacto esperado en 5 años | Moderado en el corto plazo; mayor potencial si se integra con plataformas y se generan bases de datos sólidas. |
| Estrategias recomendadas | Iniciar con proyectos piloto, comparar resultados con métodos tradicionales, capacitar técnicamente en programación y uso de IA. |
| Tipo de formación recomendada | Análisis de datos, procesamiento y validación de resultados, uso de herramientas especializadas. |
| Comentario final | Considera urgente actualizarse para seguir siendo competitivos; reconoce que la tecnología cuesta al principio, pero trae grandes beneficios. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.4. Entrevistado 4.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo | Ingeniero de proyectos Senior |
| Años de experiencia | 8 años. |
| Nivel de automatización actual | Bajo. Utiliza principalmente Excel, referencias históricas y cotizaciones. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. No ha recibido formación específica y su empresa no la ha explorado |
| Uso de IA en su organización | No. Aunque utiliza herramientas como ChatGPT para consultas, no se ha implementado IA formalmente en presupuestación. |
| Principales desafíos actuales | Entendimiento del alcance por todos los involucrados y presupuestación basada en información incompleta. |
| Errores comunes en proyectos | Omisión de rubros clave, falta de integración entre procesos, y carencia de planificación formal. |
| Necesidades prioritarias | Estandarización de presupuestos, alineación entre equipos y documentación clara de proyectos. |
| Mecanismo de mejora continua | Equipos interdisciplinarios con planificación más fluida e integral. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Muy alto. Cree que puede transformar el proceso. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Destaca que la IA depende de los datos que ingresa el humano, por lo que siempre debe haber supervisión humana. |
| Obstáculos para implementación de IA | Desconocimiento, falta de capacitación y posibles costos. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación técnica al personal. |
| Impacto esperado en 5 años | Bajo en Costa Rica por falta de preparación, pero con potencial si se capacita al personal. |
| Estrategias recomendadas | Integrar la IA con herramientas conocidas (como Excel), y acompañarla de capacitación técnica. |
| Tipo de formación recomendada | Capacitación técnica sobre qué es IA y cómo se puede usar. |
| Comentario final | Tiene interés en aprender más. Cree que la IA puede aportar mucho y facilitar la estimación de costos. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.5. Entrevistado 5.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo | Ingeniero en construcción |
| Años de experiencia | 15 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza AutoCAD, Excel, Revit y Presto, con integración parcial entre herramientas. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Medio. Ha explorado algunas aplicaciones, pero sin implementación formal. |
| Uso de IA en su organización | En exploración. Aún no implementada, pero con interés en avanzar. |
| Principales desafíos actuales | Variabilidad de precios, falta de planificación detallada, escasez de mano de obra calificada y trámites burocráticos. |
| Errores comunes en proyectos | Subestimación de costos indirectos, cronogramas poco realistas y cambios de alcance mal documentados |
| Necesidades prioritarias | Mejor integración entre diseño y presupuesto, capacitación continua y digitalización de procesos. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí. Se realiza una reunión post mortem al final de cada proyecto, documentando lecciones aprendidas. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Podría ayudar a predecir escenarios, reducir errores. |
| Reemplazo del estimador humano | Parcialmente. Puede automatizar tareas repetitivas, pero no sustituye el juicio técnico. |
| Obstáculos para implementación de IA | Costo, falta de conocimientos, resistencia al cambio, ausencia de software adaptado y datos no estructurados. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación en análisis de datos, bases históricas estructuradas, pilotos en proyectos pequeños, alianzas con universidades. |
| Impacto esperado en 5 años | Alta utilidad para empresas con gran volumen de datos. Mejora en licitaciones, proyecciones vvy análisis de tendencias. |
| Estrategias recomendadas | Iniciar con modelos predictivos en Excel o Power BI, estandarizar formatos de datos e invertir en personal mixto (técnico + analítico). |
| Tipo de formación recomendada | Ciencia de datos aplicada a construcción, Power BI, Python básico, IA para costos. |
| Comentario final | La IA no es una amenaza, sino una oportunidad. Costa Rica debe avanzar gradualmente con visión estratégica y apertura al cambio. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.6. Entrevistado 6.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo | Estimador especialista |
| Años de experiencia | 5 años |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza Edge Estimating, Bluebeam y AutoCAD en menor medida. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. No ha participado en procesos de implementación. |
| Uso de IA en su organización | No se ha considerado seriamente. |
| Principales desafíos actuales | Control de costos y seguimiento entre lo estimado y lo ejecutado. |
| Errores comunes en proyectos | Planificación poco realista, fallos en la comunicación y problemas con permisos. |
| Necesidades prioritarias | Mejor control de obra, estandarización de procesos y comunicación efectiva. |
| Mecanismo de mejora continua | No existe un mecanismo formal aún, aunque se busca implementar análisis postproyecto |
| Potencial de la IA en presupuestación | Podría ayudar a predecir escenarios, reducir errores. |
| Reemplazo del estimador humano | Sí, en algunas tareas específicas podría hacerlo a largo plazo. |
| Obstáculos para implementación de IA | Falta de conocimientos, resistencia al cambio y ausencia de bases de datos estructuradas. |
| Medidas necesarias para adopción | Mostrar beneficios claros, generar deseo de implementación y realizar pruebas piloto. |
| Impacto esperado en 5 años | Uso creciente en tareas repetitivas y automatización básica del proceso de presupuestación. |
| Estrategias recomendadas | Pruebas piloto, adopción progresiva y exploración de herramientas disponibles. |
| Tipo de formación recomendada | Capacitación formal combinada con autoaprendizaje del personal. |
| Comentario final | Recomienda compartir experiencias y casos de éxito para motivar la implementación. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.7. Entrevistado 7.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo y empresa | Arquitecta en firma internacional de diseño. |
| Años de experiencia | 8 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza herramientas BIM y plataformas de coordinación. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Alto. Participa en procesos que integran IA para simulaciones y análisis de datos. |
| Uso de IA en su organización | Sí, principalmente en etapas de diseño y análisis. |
| Principales desafíos actuales | Falta de integración entre software de diseño y herramientas de análisis económico. |
| Errores comunes en proyectos | Subestimación de costos y mal dimensionamiento de espacios. |
| Necesidades prioritarias | Herramientas que integren diseño con análisis de costos en tiempo real. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí, mediante revisión de procesos y capacitaciones internas. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Alto, especialmente para simular escenarios y tomar decisiones más informadas. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Cree que debe ser una colaboración entre IA y profesionales. |
| Obstáculos para implementación de IA | Falta de compatibilidad entre software y resistencia al cambio. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación y mejores plataformas interoperables. |
| Impacto esperado en 5 años | Transformación significativa del proceso de diseño y estimación. |
| Estrategias recomendadas | Alianzas con empresas tecnológicas, mejora de flujos de trabajo. |
| Tipo de formación recomendada | Cursos prácticos de integración entre IA y herramientas de diseño. |
| Comentario final | La IA es una aliada clave, pero debe implementarse de forma ética y consciente. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.8. Entrevistado 8.

| Tema | Resumen |
|---|--|
| Cargo y empresa | Director de diseño en firma costarricense. |
| Años de experiencia | 14 años. |
| Nivel de automatización actual | Alto. Uso intensivo de BIM y herramientas de simulación. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Alto. Ha liderado pruebas de herramientas de IA. |
| Uso de IA en su organización | Sí, particularmente en análisis de rendimiento y procesos de diseño paramétrico. |
| Principales desafíos actuales | Falta de integración entre áreas técnicas y presupuestación. |
| Errores comunes en proyectos | Diseños que no consideran el costo desde el inicio. |
| Necesidades prioritarias | Herramientas de costo predictivo desde etapas tempranas. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí. Aplican revisiones periódicas y actualización de procesos. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Muy alto. Ve valor en el análisis de datos y escenarios. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Considera que la interpretación humana sigue siendo clave. |
| Obstáculos para implementación de IA | Curva de aprendizaje, costos, y poca disponibilidad de herramientas adaptadas. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación específica y desarrollo local de software. |
| Impacto esperado en 5 años | Transformación sustancial en la forma de diseñar y presupuestar. |
| Estrategias recomendadas | Mejorar comunicación entre disciplinas, integrar IA desde formación académica. |
| Tipo de formación recomendada | Técnica, aplicada y transversal entre arquitectura e ingeniería. |
| Comentario final | La IA debe ser vista como parte del proceso creativo, no como una amenaza. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.9. Entrevista 9.

| Tema | Resumen |
|---|---|
| Cargo y empresa | Arquitecta, responsable de visualización y anteproyectos. |
| Años de experiencia | 7 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Utiliza herramientas de modelado y realidad aumentada. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Moderado. Usa IA para presentaciones y análisis visuales. |
| Uso de IA en su organización | Sí, aunque más enfocada en la parte visual y de anteproyecto. |
| Principales desafíos actuales | Vincular el diseño conceptual con datos económicos reales. |
| Errores comunes en proyectos | Falta de datos sobre costos en etapas tempranas. |
| Necesidades prioritarias | Conexión entre diseño y presupuestación desde los primeros esquemas. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí, a través de revisión de procesos y colaboración. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Alto. Puede ayudar a justificar decisiones ante el cliente. |
| Reemplazo del estimador humano | No. La interpretación del contexto y el criterio son fundamentales. |
| Obstáculos para implementación de IA | Limitaciones de software, falta de datos estandarizados. |
| Medidas necesarias para adopción | Mejorar plataformas y crear bases de datos abiertas. |
| Impacto esperado en 5 años | Avances importantes en visualización integrada con datos. |
| Estrategias recomendadas | Fomentar colaboración interdisciplinaria y actualización constante. |
| Tipo de formación recomendada | Visualización + análisis económico con soporte IA. |
| Comentario final | La IA puede cerrar la brecha entre diseño e inversión si se usa estratégicamente. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.10. Entrevistado 10.

| Tema | Resumen |
|---|--|
| Cargo y empresa | Ingeniero civil con rol técnico en obra. |
| Años de experiencia | 20 años. |
| Nivel de automatización actual | Bajo. Usa software para control, pero no inteligencia artificial. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Bajo. Ha escuchado sobre IA pero no la ha aplicado. |
| Uso de IA en su organización | No se utiliza formalmente. |
| Principales desafíos actuales | Desconexión entre presupuesto, obra y cronograma. |
| Errores comunes en proyectos | Errores de interpretación de planos, sobrecostos por omisiones. |
| Necesidades prioritarias | Integración de procesos, información más clara y anticipada. |
| Mecanismo de mejora continua | Parcial. Más reactivo que preventivo. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Interesante, pero poco conocido aún. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Cree que el conocimiento técnico práctico es irremplazable. |
| Obstáculos para implementación de IA | Falta de conocimiento, recursos y tiempo para capacitación. |
| Medidas necesarias para adopción | Formación y acompañamiento técnico. |
| Impacto esperado en 5 años | Poco cambio sin voluntad institucional. |
| Estrategias recomendadas | Proyectos piloto, mostrar beneficios en casos reales. |
| Tipo de formación recomendada | Aplicada en obra, enfocada en resultados concretos. |
| Comentario final | La IA suena bien, pero necesita aterrizar a la realidad del campo. |

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 8.11. Entrevistado 11.

| Tema | Resumen |
|---|--|
| Cargo y empresa | Arquitecto senior |
| Años de experiencia | 7 años. |
| Nivel de automatización actual | Medio. Usa Revit, AutoCAD y herramientas digitales. |
| Conocimiento sobre IA en presupuestación | Básico. Ha interactuado con ChatGPT, pero no en presupuestos. |
| Uso de IA en su organización | No. Su rol es más de apoyo técnico en diseño. |
| Principales desafíos actuales | Curva de aprendizaje, vinculación entre diseño y presupuesto. |
| Errores comunes en proyectos | Desfase entre diseño arquitectónico y posibilidades reales. |
| Necesidades prioritarias | Mejor comunicación entre diseñador y presupuestista. |
| Mecanismo de mejora continua | Sí, hay feedback interno constante. |
| Potencial de la IA en presupuestación | Muy útil para verificar datos, simular escenarios. |
| Reemplazo del estimador humano | No. Aporta, pero no reemplaza. |
| Obstáculos para implementación de IA | Falta de conocimiento y herramientas accesibles. |
| Medidas necesarias para adopción | Capacitación, adaptación de software desde universidades. |
| Impacto esperado en 5 años | Importante si se forma a nuevas generaciones. |
| Estrategias recomendadas | Introducir conceptos desde formación académica. |
| Tipo de formación recomendada | Multidisciplinaria y práctica. |
| Comentario final | Hay que prepararse desde ya, porque la IA será parte del trabajo diario. |

Nota: Elaboración propia.

8.8 Apéndice H: Fichas de casos de estudio completadas

1. Identificación del Caso – Caso #1

- Nombre del proyecto: /
- Objetivo del proyecto: Evaluar la aplicación de hojas de cálculo y análisis de precios unitarios en presupuestación educativa.
- Ubicación: Támesis, Antioquia, Colombia
- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial
 - Industrial
 - Otro (especifique): _____
- Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
- Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: _____2022_____
 - Fecha de finalización: _____2023_____
- Empresas involucradas:
 - Gobernación de Antioquia, Secretaría de Infraestructura Física .

2. Gestión del Costo en el Proyecto

- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones

3. Evaluación de Resultados

- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos

4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción?
Permite observar cómo herramientas tradicionales siguen vigentes, aunque presentan limitaciones técnicas.
- ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos?
Validar precios, estandarizar procesos y establecer controles de revisión.

5. Observaciones Adicionales:

El proyecto fue auditado por entes externos como parte de programas públicos.

1. Identificación del Caso – Caso #2

- Nombre del proyecto: /
- Objetivo del proyecto: Comparar procesos de presupuestación usando AutoCAD y Revit en proyectos VIS.
- Ubicación: Villavicencio, Meta, Colombia
- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial
 - Industrial
 - Otro (especifique): _____
- Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
- Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: ____2021_____
 - Fecha de finalización: ____2022_____
- Empresas involucradas:
 - Empresa de Desarrollo Urbano del Meta (EDUM)

2. Gestión del Costo en el Proyecto

- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones

3. Evaluación de Resultados

- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos

4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción?
Demuestra las ventajas de BIM sobre CAD tradicional en la precisión presupuestaria.
- ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos?
Capacitar equipos y aplicar revisiones iterativas durante el modelado.

5. Observaciones Adicionales:

El modelo BIM permitió detectar errores antes de obra, reduciendo reprocesos.

1. Identificación del Caso – Caso #3

- Nombre del proyecto: /
- Objetivo del proyecto: Aplicar la técnica de Reference Class Forecasting para predecir costos de infraestructura vial.
- Ubicación: Hong Kong
- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial
 - Industrial
 - Otro (especifique): _____
- Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
- Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: __2015_____
 - Fecha de finalización: ____2017_____
- Empresas involucradas:
 - TR Corporation, Universidad de Hong Kong

2. Gestión del Costo en el Proyecto

- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Otro (especifique): _____Reference Class Forecasting_____
- ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones

3. Evaluación de Resultados

- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos

4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción? Ayuda a identificar sesgos de optimismo en presupuestos tempranos.
- ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos? Usar bases de datos históricas y aplicar modelos de referencia sistemáticamente.

5. Observaciones Adicionales:

Fue parte de un estudio longitudinal sobre grandes obras de transporte.

1. Identificación del Caso – Caso #4

- Nombre del proyecto: /
- Objetivo del proyecto: Evaluar el uso de Bluebeam Revu para trazabilidad de presupuestos y coordinación digital.
- Ubicación: Alemania, Noruega, Reino Unido

- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial
 - Industrial
 - Otro (especifique): _____
- Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
- Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: ___2016_____
 - Fecha de finalización: ___2019_____
- Empresas involucradas:
 - Firms using Bluebeam Revu en consorcios

2. Gestión del Costo en el Proyecto

- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones

3. Evaluación de Resultados

- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos

4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción?
Facilita la colaboración entre actores del proyecto y la revisión en tiempo real.
- ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos?
Definir responsables de revisión y estandarizar flujos de trabajo.

5. Observaciones Adicionales:

Se observó mayor eficiencia en trazabilidad de órdenes de cambio.

1. Identificación del Caso – Caso #5

- Nombre del proyecto: /
- Objetivo del proyecto: Aplicar simulación Monte Carlo para evaluar incertidumbre en presupuestos de construcción.
- Ubicación: EE.UU., Alemania
- Tipo de proyecto:
 - Infraestructura
 - Edificación comercial
 - Edificación residencial

- Industrial
 - Otro (especifique): _____
 - Tamaño del proyecto (USD):
 - Menos de 100,000
 - 100,000 - 500,000
 - 500,000 - 1,000,000
 - 1,000,000 - 5,000,000
 - Más de 5,000,000
 - Año de inicio y finalización:
 - Fecha de inicio: __2020_____
 - Fecha de finalización: ____2022_____
 - Empresas involucradas:
 - Bechtel, Jacobs Engineering
- 2. Gestión del Costo en el Proyecto**
- ¿Qué método de presupuestación se utilizó?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Otro (especifique): __Simulación de Monte Carlo_____
 - ¿Se presentaron desviaciones presupuestarias?
 - Sí, superiores al 10%
 - Sí, entre 5% y 10%
 - No, menores al 5%
 - No hubo desviaciones
- 3. Evaluación de Resultados**
- ¿Se cumplieron los objetivos de costos del proyecto?
 - Sí, sin desviaciones significativas
 - Sí, con algunas desviaciones controladas
 - No, hubo sobrecostos significativos
- 4. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto**
- ¿Cómo contribuye este caso al análisis de la gestión de costos en proyectos de construcción?

Permite cuantificar riesgos de desviación de costos con datos históricos.
 - ¿Qué recomendaciones pueden extraerse de este caso para mejorar la eficiencia presupuestaria en futuros proyectos?

Complementar con control de costos y supuestos realistas.
- 5. Observaciones Adicionales:**
- Su uso requiere personal técnico calificado y familiaridad con estadística.
- 7. Identificación del Caso – Caso #1**
- Nombre de la prueba/experimento: Towards Automated Construction Quantity Take-Off
 - Objetivo del experimento: Desarrollar un sistema automatizado de extracción de cantidades utilizando reglas codificadas a partir de planos.
 - Ubicación (si aplica): Corea del Sur
 - Tipo de prueba:
 - Simulación computacional
 - Implementación piloto
 - Comparación con métodos tradicionales
 - Evaluación en entorno real
 - Otro (especifique): _____
 - Año de inicio y finalización:

Fecha de inicio: _____2022_____

Fecha de finalización: _____2023_____

- Entidades involucradas:
Universidad de Hanyang

8. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 - [] Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - [x] Software especializado
 - [x] Integración con modelos BIM
 - [x] Modelos de Inteligencia Artificial
 - [] Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 - [x] Sí, hubo variaciones significativas
 - [] Sí, pero fueron menores
 - [] No, los resultados fueron similares

9. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 - [x] Sí, en toda la evaluación
 - [] Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 - [] No, pero se hizo un análisis teórico
 - [] No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 - [x] Reducción del tiempo de estimación
 - [x] Mayor precisión en los costos
 - [x] Reducción de errores manuales
 - [] No se observó una mejora significativa

10. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 - [x] Sí, los resultados fueron positivos
 - [] Sí, pero se requieren mejoras
 - [] No, no hubo beneficios claros

11. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?
Permite automatizar la extracción de cantidades con alta precisión y menor intervención humana.
- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?
Muestra una aplicación práctica de IA simbólica para optimizar procesos técnicos en la etapa de estimación.
- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?
Sirve como evidencia empírica del potencial de IA para reducir errores, aumentar eficiencia y facilitar la transición desde métodos tradicionales.

12. Observaciones Adicionales:

El estudio destaca la importancia de la estandarización de objetos y vocabulario técnico para mejorar los resultados.

1. Identificación del Caso – Caso #2

- Nombre de la prueba/experimento: Comparison of Artificial Intelligence techniques for Project Conceptual Cost Prediction
- Objetivo del experimento: Comparar la precisión de redes neuronales artificiales para estimar costos conceptuales en proyectos de construcción.
- Ubicación (si aplica): Polonia
- Tipo de prueba:

- Simulación computacional
- Implementación piloto
- Comparación con métodos tradicionales
- Evaluación en entorno real
- Otro (especifique): _____

- Año de inicio y finalización:
Fecha de inicio: ____2017____
Fecha de finalización: ____2019____
- Entidades involucradas:
Silesian University of Technology

2. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 Software especializado
 Integración con modelos BIM
 Modelos de Inteligencia Artificial
 Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 Sí, hubo variaciones significativas
 Sí, pero fueron menores
 No, los resultados fueron similares

3. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 Sí, en toda la evaluación
 Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 No, pero se hizo un análisis teórico
 No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 Reducción del tiempo de estimación
 Mayor precisión en los costos
 Reducción de errores manuales
 No se observó una mejora significativa

4. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 Sí, los resultados fueron positivos
 Sí, pero se requieren mejoras
 No, no hubo beneficios claros

5. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?
Valida el uso de redes neuronales para estimar costos desde fases tempranas del proyecto.
- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?
Aplica IA en contextos comparativos, demostrando superioridad frente a métodos tradicionales.
- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?
Proporciona fundamentos para adoptar modelos neuronales como apoyo a la toma de decisiones estratégicas.

6. Observaciones Adicionales:

El estudio utilizó una base de datos histórica amplia, clave para el entrenamiento de los modelos.

1. Identificación del Caso – Caso #3

- Nombre de la prueba/experimento: Machine Learning Algorithms for Constructions Cost Prediction – A Systematic Review

- Objetivo del experimento: Evaluar y comparar el rendimiento de distintos algoritmos de machine learning en la estimación de costos.
- Ubicación (si aplica): Polonia
- Tipo de prueba:
 - Simulación computacional
 - Implementación pilo
 - Comparación con métodos tradicionales
 - Evaluación en entorno real
 - Otro (especifique): _____
- Año de inicio y finalización:
Fecha de inicio: ____2019_____
Fecha de finalización: __2021_____
- Entidades involucradas:
Silesian University of Technology

2. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Modelos de Inteligencia Artificial
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 - Sí, hubo variaciones significativas
 - Sí, pero fueron menores
 - No, los resultados fueron similares

3. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 - Sí, en toda la evaluación
 - Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 - No, pero se hizo un análisis teórico
 - No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 - Reducción del tiempo de estimación
 - Mayor precisión en los costos
 - Reducción de errores manuales
 - No se observó una mejora significativa

4. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 - Sí, los resultados fueron positivos
 - Sí, pero se requieren mejoras
 - No, no hubo beneficios claros

5. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?
Permite seleccionar el algoritmo más adecuado según el tipo de proyecto y base de datos disponible.
- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?
Aporta una base comparativa técnica útil para la selección de herramientas IA.
- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?
Es clave para establecer criterios de elección de algoritmos IA en procesos presupuestarios.

6. Observaciones Adicionales:

El estudio destaca a XGBoost como el algoritmo más eficiente entre los evaluados.

1. Identificación del Caso – Caso #1

- Nombre de la prueba/experimento: Open BIM-based quantity take-off system for schema
- Objetivo del experimento: Automatizar el proceso de extracción de cantidades desde modelos BIM utilizando reglas programadas.
- Ubicación (si aplica): Corea del Sur
- Tipo de prueba:
 - Simulación computacional
 - Implementación piloto
 - Comparación con métodos tradicionales
 - Evaluación en entorno real
 - Otro (especifique): _____
- Año de inicio y finalización:
 Fecha de inicio: _2014_____
 Fecha de finalización: ___2015_____
- Entidades involucradas:
 Yonsei University

2. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Modelos de Inteligencia Artificial
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 - Sí, hubo variaciones significativas
 - Sí, pero fueron menores
 - No, los resultados fueron similares

3. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 - Sí, en toda la evaluación
 - Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 - No, pero se hizo un análisis teórico
 - No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 - Reducción del tiempo de estimación
 - Mayor precisión en los costos
 - Reducción de errores manuales
 - No se observó una mejora significativa

4. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 - Sí, los resultados fueron positivos
 - Sí, pero se requieren mejoras
 - No, no hubo beneficios claros

5. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?
 Reduce el trabajo manual en procesos de QTO y aumenta la eficiencia en revisión de cantidades.
- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?
 Demuestra aplicación práctica de IA simbólica embebida en plataformas BIM.
- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?
 Resalta la necesidad de estandarizar los modelos BIM para un mejor desempeño automatizado.

6. Observaciones Adicionales:

La interfaz desarrollada fue probada con distintos tipos de proyectos para validar su aplicabilidad.

1. Identificación del Caso – Caso #5

- Nombre de la prueba/experimento: Establishing Formalized Representation of Standards for Construction Cost Estimation by using Ontology Learning
- Objetivo del experimento: Desarrollar una representación formalizada del conocimiento técnico para presupuestación mediante ontologías.
- Ubicación (si aplica): China
- Tipo de prueba:
 - Simulación computacional
 - Implementación pilo
 - Comparación con métodos tradicionales
 - Evaluación en entorno real
 - Otro (especifique): _____
- Año de inicio y finalización: _____
 Fecha de inicio: __2013_____
 Fecha de finalización: __2015_____
- Entidades involucradas:
 Tsinghua University

2. Evaluación de la Gestión del Costo en la Prueba

- ¿Qué método de presupuestación se comparó en la prueba?
 - Manual (hojas de cálculo, cálculos a mano)
 - Software especializado
 - Integración con modelos BIM
 - Modelos de Inteligencia Artificial
 - Otro (especifique): _____
- ¿Se encontraron diferencias en las estimaciones de costos?
 - Sí, hubo variaciones significativas
 - Sí, pero fueron menores
 - No, los resultados fueron similares
 - No, se trató de un análisis teórico

3. Implementación de Inteligencia Artificial en la Presupuestación

- ¿Se utilizó Inteligencia Artificial en la prueba?
 - Sí, en toda la evaluación
 - Sí, pero en combinación con métodos tradicionales
 - No, pero se hizo un análisis teórico
 - No, se compararon otros métodos
- ¿Qué impacto tuvo la IA en la prueba?
 - Reducción del tiempo de estimación
 - Mayor precisión en los costos
 - Reducción de errores manuales
 - No se observó una mejora significativa

4. Evaluación de Resultados

- ¿Los resultados de la prueba confirmaron la utilidad de la IA en presupuestación?
 - Sí, los resultados fueron positivos
 - Sí, pero se requieren mejoras
 - No, no hubo beneficios claros

5. Conclusión y Relación con los Objetivos y Alcances del Proyecto

- ¿Cómo contribuye esta prueba a la mejora de la gestión de costos en construcción?
 Provee una base conceptual sólida para integrar vocabulario técnico estandarizado en procesos IA.
- ¿Cómo se relaciona esta prueba con la implementación de IA en presupuestación?
 Vincula IA semántica con representación del conocimiento técnico en construcción.
- ¿De qué manera los hallazgos pueden aportar al diseño de un marco de referencia para la adopción de IA en presupuestación?
 Es útil para estructurar marcos normativos digitales en entornos de presupuestación automatizada.

6. Observaciones Adicionales:

El modelo fue validado por expertos técnicos a través de entrevistas y simulaciones.

Capítulo 9 Anexos

9.1 Anexo 1:

Table 2

Application of AI and ML in the planning phase.

| Sector | Title | Year | Application | Ref |
|--------|--|------|---|------|
| AI | A comparative study of artificial intelligence methods for project duration forecasting | 2016 | Prediction of accurate project duration; Progress evaluation during early stages of the project. | [49] |
| AI | A review of artificial intelligence-based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models | 2017 | Building energy use prediction without requiring detailed physical information of the building. | [96] |
| AI | Predicting construction cost and schedule success using artificial neural networks ensemble and support vector machines classification models | 2012 | Project cost and schedule success prediction | [97] |
| ML | Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research | 2020 | Simulating the layout of a construction site with respect to specific zones, strategic positioning of construction equipment. | [54] |
| ML | Potentials of artificial intelligence in construction management | 2020 | Breaking down complex situations in construction projects into smaller separable subtasks. | [98] |
| ML | Automated vision tracking of project related entities | 2011 | Tracking of project-related entities using 3D spatial coordinates over time with automated vision-based techniques. | [55] |
| AI | A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting | 2014 | Building energy consumption forecasting while coping with complex and varying building system parameters | [50] |
| AI | Occupational risk assessment in construction industry – overview and reflection | 2011 | In order to assess and analyze potential occupational hazards, as well as propose effective strategies for risk management, the goal is to prevent any instances of plagiarism. | [52] |
| ML | Augmented Reality for Construction Site Monitoring and Documentation | 2014 | Creating a system that employs Augmented Reality to display real-time progress updates of a construction site on-site. | [99] |
| AI | Application areas of augmented reality and virtual reality in construction project management: A scoping review | 2021 | Developing an assistive interface for a teleoperated crane by implementing path planning in the context of heavy equipment operator training. | [53] |
| ML | A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety | 2018 | The sequence includes safety training and education, hazards recognition and identification, and safety instruction and inspection. | [56] |
| ML | Using Deep Learning Artificial Intelligence to Improve Foresight Method in the Optimization of Planning and Scheduling of Construction Processes | 2022 | More rapidly review and recommend more planning options for scheduling complex construction projects | [48] |

Table 3

Application of AI and ML in the design phase.

| Sector | Title | Year | Application | Ref |
|--------|--|------|--|-------|
| AI | BIM-Based Visualization Research in the Construction Industry: A Network Analysis | 2019 | Efficient formwork design through the visualization of the formwork quantity and schedule. | [62] |
| ML | Integration of BIM and GIS in the sustainable built environment: A review and bibliometric analysis | 2019 | Utilizing visualization and simulation to enhance building safety during various construction phases. | [100] |
| ML | BIM for Structural Engineering: A Bibliometric Analysis of the Literature | 2019 | To reduce the quantity of request for information (RFI) items generated by contractors; enabling every relevant stakeholder to examine multiple existing options and formulate potential design plans. | [63] |
| AI | Knowledge-based system for resolving design clashes in building information models | 2020 | Minimizing design clashes; preventing the possibility of clash between branch MEP components and structural barriers. | [65] |
| AI | Quantitative Review of Construction 4.0 Technology Presence in Construction Project Research | 2020 | Enabling estimators to retrieve the relevant information directly from the design and to make their estimates available to other parties. | [101] |
| ML | Beyond the clash: investigating BIM-based building design coordination issue representation and resolution | 2019 | Detect clashes automatically among ducts, cable trays, and lighting systems. | [64] |
| AI | Evaluation of BIM-based LCA results for building design | 2020 | Assessing life cycle impact: utilizing automated quantity take-off to evaluate Global Warming Potential (GWP) in building design process. | [66] |
| ML | An Integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design | 2016 | An investigation into the embodied energy linked to the supply chain of building materials, focusing on Environmental Product Declarations (EPDs) provided by suppliers | [67] |
| AI | Using 4D BIM to assess construction risks during the design phase | 2019 | The evaluation of construction risks involves analysing unit risk factors associated with design elements, taking into account their frequency, severity, and exposure levels. | [102] |
| ML | Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and | 2013 | Enhancing the likelihood of successfully executing a construction project can be achieved by leveraging Augmented Reality's visualization | [103] |