

León, W., Guevara, J., García-López, N. (2024). Evaluación de impacto de prácticas de industrialización en la confiabilidad presupuestal de proyectos inmobiliarios. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas de congreso del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción (IX ELAGEC2024)*.

# EVALUACIÓN DE IMPACTO DE PRÁCTICAS DE INDUSTRIALIZACIÓN EN LA CONFIABILIDAD PRESUPUESTAL DE PROYECTOS INMOBILIARIOS

**William León**<sup>1</sup> – [wm.leon10@uniandes.edu.co](mailto:wm.leon10@uniandes.edu.co)

**Jose Guevara**<sup>2</sup> - [ja.guevara915@uniandes.edu.co](mailto:ja.guevara915@uniandes.edu.co)

**Nelly García-López**<sup>3</sup> - [ne-garci@uniandes.edu.co](mailto:ne-garci@uniandes.edu.co)

<sup>1</sup> Departamento ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup> Departamento ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

<sup>3</sup> Departamento ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

## RESUMEN

Este estudio propone un método cuantitativo y probabilístico diseñado para analizar la confiabilidad presupuestal en proyectos de construcción mediante el uso de modelos de simulación numérica. El objetivo principal es evaluar cómo la variabilidad combinada de los costos de ejecución a lo largo del proyecto, bajo condiciones específicas de industrialización, impacta la estabilidad financiera y la precisión presupuestal. A través de la implementación del método de Monte Carlo, se examina exhaustivamente el efecto de las prácticas de industrialización en la confiabilidad de los costos, proporcionando una herramienta cuantitativa robusta para evaluar la variabilidad presupuestal y sus consecuencias. Los hallazgos indican que la variabilidad en la asignación y el uso de recursos no solo incrementa la incertidumbre y el riesgo financiero, sino que también subraya la necesidad urgente de estandarizar procesos para mitigar estos riesgos. Además, este trabajo aborda la escasez significativa de métodos cuantitativos disponibles para gerentes de proyectos que buscan evaluar con precisión el impacto de la industrialización en la confiabilidad presupuestal. Ofrece evidencia numérica sólida que respalda la industrialización de procesos como una estrategia clave para la optimización financiera y la mitigación de riesgos en proyectos de construcción, facilitando así una toma de decisiones más informada y efectiva.

## PALABRAS CLAVE

Construcción industrializada; Confiabilidad presupuestal; Simulación numérica; Sobrecostos, Sostenibilidad financiera

## INTRODUCCIÓN

La variabilidad en los costos de ejecución de las actividades en proyectos de construcción influye significativamente en la confiabilidad presupuestal y en el rendimiento general del proyecto (Tommelein, 1997). Sin embargo, el grado de esta variabilidad en los diferentes sistemas de producción en construcción aún no se comprende claramente (Ballesteros-Pérez et al., 2020). Existe una escasez de evidencia cuantitativa que explique el comportamiento de la variabilidad bajo estrategias de gestión enfocadas en la industrialización de procesos, especialmente en comparación con los enfoques tradicionales de gestión de la construcción (Vásquez-Hernández et al., 2022). En consecuencia, persiste una brecha crítica de conocimiento en el análisis cuantitativo, numérico y probabilístico de la variabilidad como parámetro fundamental para comprender la incertidumbre y el riesgo en la confiabilidad presupuestal de proyectos inmobiliarios (Barraza et al., 2004). Es esencial desarrollar modelos cuantitativos robustos que faciliten evaluaciones comparativas de las ventajas de diversas estrategias de producción en construcción, específicamente en términos de control de la variabilidad. Dichos modelos pueden contribuir a la mejora continua de la confiabilidad presupuestal y a aumentar la eficiencia económica de los proyectos de construcción.

La comparación de estrategias tradicionales de producción con iniciativas recientes centradas en la estandarización de procesos y la industrialización de métodos de construcción ha sido limitada, especialmente en términos de un análisis integral de la variabilidad (Liu et al., 2011). La construcción industrializada, como práctica reciente, ha ganado una prominencia significativa debido a sus beneficios potenciales, incluidos la reducción del tiempo de ejecución, la optimización de la utilización de recursos, la logística simplificada y las capacidades mejoradas de producción en masa (Qi et al., 2021). Sin embargo, al igual que cualquier método de construcción, la construcción industrializada enfrenta desafíos inherentes que requieren un mayor refinamiento. De manera alarmante, la industria de la construcción en general carece de la adopción de herramientas cuantitativas que controlen eficazmente el rendimiento del proyecto en términos de tiempo y costo (González et al., 2009). Al proporcionar evidencia cuantitativa robusta del impacto de estos métodos y metodologías en el rendimiento del proyecto, es posible fomentar una mayor implementación en las organizaciones, permitiendo que el personal de gestión y de campo seleccione, estandarice e implemente las estrategias más efectivas para sus proyectos (Castillo et al., 2015).

No obstante, la ejecución de proyectos de construcción, incluidos aquellos que emplean metodologías de construcción industrializada orientadas a la estandarización de procesos, enfrenta numerosos desafíos caracterizados por una alta variabilidad en los costos de ejecución de las actividades (Gonzalez et al., 2008). La variabilidad en los costos de ejecución impacta directamente la confiabilidad presupuestal, aumentando la incertidumbre, dificultando la toma de decisiones informadas y amplificando los riesgos del proyecto (Poshdar et al., 2014). Aunque la variabilidad afecta la confiabilidad presupuestal en todos los sistemas de producción en construcción, el nivel específico de impacto en cada sistema sigue siendo desconocido (Ekanayake et al., 2021). En consecuencia, realizar un análisis integral para determinar el alcance de este impacto es crucial, ya que la confiabilidad presupuestal es un concepto fundamental para fomentar la mejora continua, aumentar la eficiencia, la productividad, y comprender el rendimiento general del proyecto (Laufer et al., 1994).

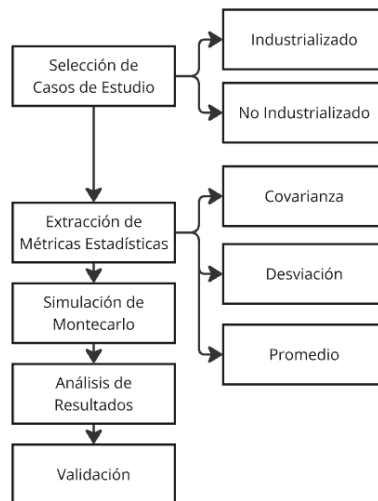
Abordar la brecha de conocimiento mediante modelos de análisis cuantitativo es esencial para evaluar el impacto de la variabilidad en la confiabilidad presupuestal en diversos sistemas de gestión de la producción (Kedir & Hall, 2021). Esta investigación emplea simulaciones numéricas y herramientas estadísticas para explorar las ventajas comparativas de diferentes metodologías de gestión y construcción. El objetivo es desarrollar y validar un modelo cuantitativo y probabilístico que analice cómo la variabilidad en los costos de ejecución afecta la confiabilidad presupuestal. Comparando estrategias de construcción industrializadas con enfoques tradicionales, el modelo proporcionará evidencia cuantitativa para mitigar la incertidumbre, optimizar el rendimiento económico de los proyectos y fomentar la adopción de prácticas de industrialización en la construcción.

Este documento comienza presentando los casos de estudio, seguido de la extracción de métricas clave como desviación estándar y promedios de costos de ejecución de las actividades de los proyectos. A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones numéricas y sus valores de confiabilidad. Finalmente, se comparan los proyectos para evaluar el impacto de la industrialización en la confiabilidad presupuestal y su impacto en la mitigación del riesgo.

## **METODOLOGÍA**

Esta investigación presenta una metodología integral que utiliza una de simulación numérica y análisis estadístico para evaluar la variabilidad en los costos de ejecución de actividades en proyectos de construcción y su impacto en la confiabilidad presupuestal (Lindhard et al., 2019). Se emplearon específicamente simulaciones de Monte Carlo (Echard et al., 2011) para analizar una dupla de proyectos inmobiliarios reales en Colombia, caracterizados por diferentes niveles de industrialización, estandarización de procesos y prácticas organizacionales. Los estudios de caso seleccionados se centraron en proyectos de construcción residencial debido a la complejidad de su ejecución y la naturaleza multifacética de la gestión involucrada. Los proyectos residenciales incluyen una amplia gama de actividades, desde trabajos de cimentación hasta acabados interiores, con interacciones complejas entre numerosos subcontratistas y una colaboración continua entre disciplinas. La finalización oportuna de estos proyectos es crucial para garantizar la satisfacción del cliente y un rendimiento financiero óptimo para el propietario del proyecto.

Para el análisis, se consolidó un presupuesto integral para cada proyecto basado en la información recopilada de aproximadamente 4800 unidades de construcción residencial, teniendo en cuenta sus costos esperados y sus costos ejecutados (Salhab et al., 2022). Luego, se establecieron líneas base del proyecto y, utilizando datos históricos relacionados con los costos de ejecución, se emplearon modelos de simulación numérica para comparar el rendimiento real del proyecto con las líneas base presupuestales predefinidas (González et al., 2010). Estas simulaciones permitieron captar el efecto acumulativo de la variabilidad en los costos de todas las actividades del proyecto y su influencia en la confiabilidad presupuestal (Thomas et al., 2002). Los métodos de simulación utilizados permitieron cuantificar la probabilidad de incurrir en sobrecostos en comparación con la línea base y determinar el nivel de riesgo asociado a la variabilidad en los costos de ejecución de las actividades (Abdelgawad & Fayek, 2010). Los pasos detallados del estudio se discuten a continuación y se muestran en la Figura 1.



**Figura 1.** Resumen Metodológico

### **PASO 1: ESTUDIOS DE CASO**

Para esta investigación, se seleccionaron dos proyectos de una base de datos histórica que incluye más de 40 proyectos en Colombia de la última década. Uno de los proyectos fue industrializado y el otro no. Ambos proyectos, desarrollados por la misma empresa, los mismos recursos, tecnología, equipos y mano de obra, permiten una comparación efectiva al aislar el impacto de la industrialización en la eficiencia y confiabilidad presupuestal. La investigación resalta cómo la variabilidad en los costos de ejecución, influenciada por los métodos constructivos, afecta la confiabilidad presupuestal (Salhab et al., 2022; Arashpour & Arashpour, 2015). Esta selección facilita un análisis exhaustivo y revela la relación entre las metodologías constructivas y el rendimiento financiero del proyecto.

Además, la investigación se centró en proyectos completados en los últimos cinco años que muestran claras diferencias en sus sistemas de gestión de producción de construcción (Vásquez-Hernández et al., 2022). Específicamente, se incluyeron una combinación de proyectos que utilizaban el Método de la Ruta Crítica (CPM) y el Sistema del último planificador (LPS). Se consideraron tanto enfoques de construcción tradicionales como industrializados en el proceso de selección (Heigermoser et al., 2019). Para establecer la relación entre confiabilidad, sistema de producción y costo de ejecución (Olivieri et al., 2019), se eligió un proyecto Industrializado y un proyecto NO Industrializado (Lessing, 2005).

### **PASO 2: DEFINICIÓN DE VARIABLES Y MÉTRICAS ESTADÍSTICAS**

El objetivo principal de esta etapa fue identificar las variables clave y las métricas estadísticas que forman la base para los modelos de simulación numérica, con un enfoque en evaluar el rendimiento de los proyectos de construcción. Se determinaron la media y la desviación estándar de los costos de las actividades como métricas cruciales, obtenidas mediante el análisis de una muestra significativa para estimar con precisión los presupuestos elaborados en la fase de estructuración de los proyectos y medir la variabilidad asociada a su ejecución (Thomas et al., 2002). Los investigadores también exploraron la covarianza entre los costos de los capítulos de construcción para comprender las interdependencias y los posibles impactos en los resultados del proyecto. Además, se estableció una función de falla para evaluar la confiabilidad presupuestal,

cuantificando la probabilidad de desviaciones del costo planificado y proporcionando un indicador de la robustez de la planificación financiera del proyecto y los riesgos asociados (Aven, 2016). Este análisis integral de variables y métricas contribuye a una comprensión más profunda del rendimiento del proyecto y mejora la efectividad de la planificación en la industria de la construcción, favoreciendo la rentabilidad de los proyectos.

### **PASO 3: DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

Los autores analizaron el concepto de confiabilidad presupuestal empleando modelos de simulación numérica de Monte. Estos modelos se construyeron para realizar 10,000 simulaciones, permitiendo una evaluación rigurosa del impacto de los sistemas industrializados en la confiabilidad presupuestal del proyecto en términos de variabilidad (Arashpour & Arashpour, 2015). Se consideró que la confiabilidad de un proyecto era satisfactoria cuando la ocurrencia de simulaciones que superaban la función de falla era mínima. La función de falla, definida como el costo proyectado derivado de la línea base del proyecto, sirvió como medida de la probabilidad de encontrar sobrecostos en los presupuestos planificados del proyecto (Rahman & Xu, 2004).

Para evaluar la frecuencia de los sobrecostos en los proyectos, los métodos utilizaron el valor de la función de falla y realizaron múltiples simulaciones a lo largo del período de construcción del proyecto. El método Monte Carlo generó valores aleatorios en el rango de 0 a 1 para simular los costos de cada actividad considerando sus desviaciones estándar asociadas (Echard et al., 2011). En el contexto de este estudio, la incertidumbre surgió de la variabilidad en el costo de ejecución de las actividades (Salhab et al., 2022).

### **PASO 4: RESULTADOS**

A través del análisis y la síntesis de las principales métricas estadísticas y el desarrollo de modelos de simulación numérica, los autores obtuvieron información cuantitativa sobre la confiabilidad presupuestal, la variación promedio en el costo de las actividades y la interacción entre los sistemas de construcción y el rendimiento financiero (Rahman & Xu, 2004). Para los modelos de Monte Carlo, se definió un parámetro crítico conocido como la función de falla para determinar el modelo de costo final. La función de falla (FF) se calculó sumando los costos promedio de las actividades dentro de la ruta crítica del proyecto, considerando su secuencia de ejecución y las relaciones de precedencia, como se expresa en la Ecuación 1:

$$FF = \sum_{i=1}^n C_i \quad \text{Fórmula 1}$$

Aquí,  $n$  representa el número de actividades en la ruta crítica, y  $C$  corresponde al costo promedio de cada actividad. Utilizando el valor de la función de falla y la desviación estándar del costo de las actividades del proyecto, se realizaron múltiples iteraciones para simular varios escenarios de ejecución del proyecto. Estas simulaciones permitieron determinar la probabilidad de falla (PF), tal como se expresa en la Ecuación 2:

$$PF = \frac{nf}{n} \quad \text{Fórmula 2}$$

Donde  $nf$  corresponde al número de iteraciones que resultaron en falla, definiéndose la falla como el exceso el costo especificado por la función de falla (FF). Finalmente, la confiabilidad presupuestal (CP) proporcionó una medida de la capacidad del proyecto

para adherirse a los costos planificados, con valores más altos indicando un mayor nivel de confiabilidad. Esto se cuantificó como se muestra a continuación.

$$CP = 1 - PF$$

**Fórmula 3**

### PASO 5: VALIDACIÓN

En esta etapa, se evaluó la consistencia de los modelos comparando los resultados obtenidos de cada método de simulación numérica con la literatura existente y bajo la revisión de evaluadores por pares. Esta comparación tuvo como objetivo garantizar que el análisis fuera válido y que los modelos exhibieran un comportamiento acorde a la literatura. Una vez confirmada la consistencia del modelo, se realizó un análisis comparativo de los proyectos A y B para extraer conclusiones claras sobre el impacto de la industrialización en la confiabilidad presupuestal, la evaluación de riesgos y la toma de decisiones. Para asegurar un proceso de validación confiable, procesamiento de datos y generación de resultados, se implementó una estrategia de control de validación interna. Esta estrategia implicó la selección de proyectos con características específicas mencionadas en el Paso 1, facilitando la comparación significativa de parámetros, la replicabilidad del modelo y la derivación de métricas estandarizadas (Taylor et al., 2011).

### DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

La información general recopilada de los dos casos de estudio se muestra en la Tabla 1. Basándose en esto, la Tabla 2 presenta un resumen de los costos de las actividades en la línea base de programación inicial y al finalizar la construcción. Incluye datos para 4800 unidades residenciales en los Proyectos A y B.

**Tabla 1.** Características casos de estudio

Proyecto	Tipo	Número Unidades	Área (m <sup>2</sup> )	Método Construcción	Planeación
"A"	Apartamentos	2400	45	Industrializado	LPS
"B"	Apartamentos	2400	45	NO industrializado	CPM

**Tabla 2.** Presupuesto torre 1, 2 y 3

Proyecto A							
	Peso sobre el presupuesto	Proyectado T1	Proyectado T2	Proyectado T3	Ejecutado T1	Ejecutado T2	Ejecutado T3
Cimentación	13,4%	\$ 1.909.799,81	\$ 1.871.603,81	\$ 1.967.093,80	\$ 1.947.995,80	\$ 1.947.422,86	\$ 1.852.887,77
Estructura	13,4%	\$ 1.909.444,36	\$ 1.947.633,25	\$ 1.947.633,25	\$ 1.909.444,36	\$ 1.928.156,92	\$ 1.909.253,42
Formaletas	1,7%	\$ 248.765,54	\$ 256.228,51	\$ 241.302,58	\$ 241.302,58	\$ 256.278,26	\$ 253.666,22
Hierro	7,5%	\$ 1.071.400,98	\$ 1.082.114,99	\$ 1.039.258,95	\$ 1.092.829,00	\$ 1.049.651,54	\$ 1.070.436,72
Cubierta	1,9%	\$ 267.071,38	\$ 259.059,24	\$ 267.071,38	\$ 264.400,66	\$ 266.831,01	\$ 264.347,25
Impermeabilizaciones	0,8%	\$ 113.497,87	\$ 116.902,80	\$ 113.497,87	\$ 114.632,85	\$ 114.564,75	\$ 116.925,50
Mampostería	1,6%	\$ 226.881,94	\$ 220.075,48	\$ 233.688,40	\$ 226.881,94	\$ 215.673,97	\$ 236.025,28
Pañetes	0,9%	\$ 122.358,24	\$ 124.805,40	\$ 121.134,65	\$ 126.028,98	\$ 118.687,49	\$ 116.313,74
Pisos	0,9%	\$ 130.024,01	\$ 126.123,29	\$ 126.123,29	\$ 131.324,25	\$ 124.862,06	\$ 127.423,53
Instalaciones hidrosanitarias	6,1%	\$ 870.360,54	\$ 879.064,15	\$ 870.360,54	\$ 844.249,73	\$ 852.692,22	\$ 861.656,94
Aparatos sanitarios	0,7%	\$ 106.783,48	\$ 106.783,48	\$ 107.851,31	\$ 109.986,98	\$ 107.829,96	\$ 106.772,80
Instalación eléctrica	8,6%	\$ 1.221.569,85	\$ 1.258.216,95	\$ 1.233.785,55	\$ 1.197.138,46	\$ 1.220.470,44	\$ 1.270.799,12
Carpintería madera	0,6%	\$ 82.335,41	\$ 81.512,06	\$ 81.512,06	\$ 79.865,35	\$ 81.512,06	\$ 79.881,82
Carpintería metálica	5,9%	\$ 840.567,55	\$ 848.973,23	\$ 815.350,52	\$ 848.973,23	\$ 848.805,11	\$ 840.231,32
Pintura	0,6%	\$ 82.875,87	\$ 82.047,11	\$ 83.704,63	\$ 85.362,15	\$ 84.508,53	\$ 86.215,77

IX ELAGEC2024, 27 – 29 de noviembre, Viña del Mar, Chile

Cerradura y espejos	0,2%	\$ 21.542,40	\$ 21.326,98	\$ 20.896,13	\$ 21.111,55	\$ 22.188,67	\$ 20.478,21
Cocinas	1,3%	\$ 183.974,83	\$ 187.654,32	\$ 182.135,08	\$ 187.654,32	\$ 174.886,47	\$ 182.024,69
Equipos especiales	1,8%	\$ 259.132,57	\$ 259.132,57	\$ 264.315,22	\$ 261.723,90	\$ 266.906,55	\$ 253.949,92
Aseo	0,5%	\$ 72.771,99	\$ 72.044,27	\$ 73.499,71	\$ 74.227,43	\$ 72.044,27	\$ 69.177,06
Urbanismo interno	1,7%	\$ 242.253,87	\$ 249.521,49	\$ 234.986,25	\$ 239.831,33	\$ 234.986,25	\$ 252.040,93
Urbanismo interior - redes hys	2,9%	\$ 413.316,20	\$ 413.316,20	\$ 405.049,87	\$ 400.916,71	\$ 409.183,04	\$ 417.449,36
Urbanismo interior - redes elec	5,1%	\$ 733.489,56	\$ 711.484,87	\$ 711.484,87	\$ 711.484,87	\$ 690.140,33	\$ 732.829,42
Zonas comunes primeros pisos	1,3%	\$ 188.893,19	\$ 190.782,13	\$ 185.115,33	\$ 188.893,19	\$ 183.264,18	\$ 188.723,19
Salón comunal	3,5%	\$ 492.703,91	\$ 507.485,03	\$ 482.849,83	\$ 507.485,03	\$ 502.410,18	\$ 492.260,48
Plataforma 1	2,5%	\$ 361.266,26	\$ 361.266,26	\$ 368.491,59	\$ 350.428,27	\$ 350.500,53	\$ 354.040,94
Excavaciones y rellenos	1,7%	\$ 235.766,79	\$ 228.693,78	\$ 228.693,78	\$ 240.482,12	\$ 245.268,19	\$ 228.740,94

**Proyecto B**

	Peso sobre el presupuesto	Proyectado T1	Proyectado T2	Proyectado T3	Ejecutado T1	Ejecutado T2	Ejecutado T3
Cimentación	13,4%	\$ 1.718.819,82	\$ 1.718.819,82	\$ 1.684.443,43	\$ 1.753.196,22	\$ 1.616.550,05	\$ 1.583.892,47
Estructura	13,4%	\$ 1.718.499,92	\$ 1.701.314,93	\$ 1.701.314,93	\$ 1.787.239,92	\$ 1.550.258,78	\$ 1.683.614,38
Formaletas	1,7%	\$ 223.888,99	\$ 230.605,66	\$ 230.605,66	\$ 232.844,55	\$ 246.748,05	\$ 237.434,27
Hierro	7,5%	\$ 964.260,88	\$ 993.188,71	\$ 993.188,71	\$ 1.022.116,53	\$ 983.546,10	\$ 973.903,49
Cubierta	1,9%	\$ 240.364,24	\$ 247.575,17	\$ 247.575,17	\$ 247.575,17	\$ 233.153,31	\$ 233.057,17
Impermeabilizaciones	0,8%	\$ 102.148,08	\$ 104.191,04	\$ 104.191,04	\$ 107.255,48	\$ 110.442,50	\$ 105.232,95
Mampostería	1,6%	\$ 204.193,74	\$ 210.319,56	\$ 200.109,87	\$ 196.025,99	\$ 198.108,77	\$ 196.087,25
Pañetes	0,9%	\$ 110.122,41	\$ 110.122,41	\$ 112.324,86	\$ 113.426,09	\$ 102.523,97	\$ 115.694,61
Pisos	0,9%	\$ 117.021,61	\$ 114.681,18	\$ 117.021,61	\$ 124.042,90	\$ 112.200,32	\$ 110.093,93
Instalaciones hidrosanitarias	6,1%	\$ 783.324,49	\$ 767.658,00	\$ 791.157,73	\$ 728.491,77	\$ 775.334,58	\$ 706.637,02
Aparatos sanitarios	0,7%	\$ 96.105,13	\$ 97.066,18	\$ 95.144,08	\$ 98.988,29	\$ 91.165,33	\$ 94.106,14
Instalación eléctrica	8,6%	\$ 1.099.412,87	\$ 1.077.424,61	\$ 1.121.401,12	\$ 1.033.448,09	\$ 1.131.295,84	\$ 1.154.823,28
Carpintería madera	0,6%	\$ 74.101,87	\$ 76.324,93	\$ 72.619,83	\$ 78.547,98	\$ 76.977,02	\$ 74.753,97
Carpintería metálica	5,9%	\$ 756.510,79	\$ 748.945,69	\$ 764.075,90	\$ 703.555,04	\$ 748.037,87	\$ 703.555,04
Pintura	0,6%	\$ 74.588,29	\$ 73.842,40	\$ 73.096,52	\$ 79.809,47	\$ 73.096,52	\$ 69.411,86
Cerradura y espejos	0,2%	\$ 19.388,16	\$ 19.969,80	\$ 19.582,04	\$ 20.357,57	\$ 20.568,90	\$ 21.167,99
Cocinas	1,3%	\$ 165.577,34	\$ 167.233,12	\$ 165.577,34	\$ 163.921,57	\$ 167.133,77	\$ 168.756,43
Equipos especiales	1,8%	\$ 233.219,31	\$ 235.551,51	\$ 226.222,73	\$ 240.215,89	\$ 221.651,64	\$ 237.883,70
Aseo	0,5%	\$ 65.494,79	\$ 63.529,95	\$ 63.529,95	\$ 61.565,11	\$ 66.785,04	\$ 66.804,69
Urbanismo interno	1,7%	\$ 218.028,48	\$ 224.569,34	\$ 224.569,34	\$ 231.110,19	\$ 200.913,25	\$ 202.897,31
Urbanismo interior - redes hys	2,9%	\$ 371.984,58	\$ 383.144,12	\$ 379.424,27	\$ 349.665,50	\$ 386.975,56	\$ 390.807,00
Urbanismo interior - redes elec	5,1%	\$ 660.140,60	\$ 673.343,41	\$ 660.140,60	\$ 633.734,98	\$ 653.407,17	\$ 685.754,06
Zonas comunes primeros pisos	1,3%	\$ 170.003,87	\$ 164.903,76	\$ 170.003,87	\$ 181.904,15	\$ 166.603,80	\$ 164.597,75
Salón comunal	3,5%	\$ 443.433,52	\$ 430.130,51	\$ 447.867,85	\$ 438.999,18	\$ 443.433,52	\$ 416.827,51
Plataforma 1	2,5%	\$ 325.139,64	\$ 315.385,45	\$ 318.636,84	\$ 312.134,05	\$ 311.743,88	\$ 331.544,89
Excavaciones y rellenos	1,7%	\$ 212.190,11	\$ 205.824,41	\$ 212.190,11	\$ 205.824,41	\$ 203.596,41	\$ 203.787,38

**RESULTADOS**

La Tabla 3 muestra las métricas estadísticas clave derivadas de los costos de las actividades de construcción en los proyectos A y B. Esta tabla permite un análisis comparativo entre los costos proyectados al inicio de la construcción y los costos reales observados al finalizar el proyecto. Además, a cada actividad se le asigna una distribución de probabilidad que captura su comportamiento Normal, basada en una muestra robusta de datos analizados. Los proyectos A y B comparten similitudes en términos de diseño

arquitectónico, mientras que su sistema de construcción puede mostrar variaciones, incorporando diferentes niveles de industrialización.

**Tabla 3. Métricas estadísticas**

<b>Proyecto A</b>						
Capítulo	Costo promedio proyectado	Costo promedio ejecutado	Variación	Porcentaje	Desviación estándar	
Cimentación	\$ 1.916.165,80	\$ 1.916.102,14	\$ 63,66	0,00%	\$ 31,83	
Estructura	\$ 1.934.903,62	\$ 1.915.618,23	\$ 19.285,39	1,00%	\$ 9.642,69	
Formaletas	\$ 248.765,54	\$ 250.415,69	\$ 1.650,14	0,66%	\$ 825,07	
Hierro	\$ 1.064.258,31	\$ 1.070.972,42	\$ 6.714,11	0,63%	\$ 3.357,06	
Cubierta	\$ 264.400,66	\$ 265.192,98	\$ 792,31	0,30%	\$ 396,16	
Impermeabilizaciones	\$ 114.632,85	\$ 115.374,36	\$ 741,52	0,65%	\$ 370,76	
Mampostería	\$ 226.881,94	\$ 226.193,73	\$ 688,21	0,30%	\$ 344,10	
Pañetes	\$ 122.766,10	\$ 120.343,40	\$ 2.422,69	1,97%	\$ 1.211,35	
Pisos	\$ 127.423,53	\$ 127.869,94	\$ 446,42	0,35%	\$ 223,21	
Instalaciones hidrosanitarias	\$ 873.261,74	\$ 852.866,29	\$ 20.395,45	2,34%	\$ 10.197,72	
Aparatos sanitarios	\$ 107.139,42	\$ 108.196,58	\$ 1.057,16	0,99%	\$ 528,58	
Instalación eléctrica	\$ 1.237.857,45	\$ 1.229.469,34	\$ 8.388,11	0,68%	\$ 4.194,06	
Carpintería madera	\$ 81.786,51	\$ 80.419,74	\$ 1.366,77	1,67%	\$ 683,38	
Carpintería metálica	\$ 834.963,77	\$ 846.003,22	\$ 11.039,45	1,32%	\$ 5.519,73	
Pintura	\$ 82.875,87	\$ 85.362,15	\$ 2.486,28	3,00%	\$ 1.243,14	
Cerradura y espejos	\$ 21.255,17	\$ 21.259,48	\$ 4,31	0,02%	\$ 2,15	
Cocinas	\$ 184.588,08	\$ 181.521,83	\$ 3.066,25	1,66%	\$ 1.533,12	
Equipos especiales	\$ 260.860,12	\$ 260.860,12	\$ -	0,00%	\$ -	
Aseo	\$ 72.771,99	\$ 71.816,25	\$ 955,74	1,31%	\$ 477,87	
Urbanismo interno	\$ 242.253,87	\$ 242.286,17	\$ 32,30	0,01%	\$ 16,15	
Urbanismo interior - redes hys	\$ 410.560,76	\$ 409.183,04	\$ 1.377,72	0,34%	\$ 688,86	
Urbanismo interior - redes elec	\$ 718.819,77	\$ 711.484,87	\$ 7.334,90	1,02%	\$ 3.667,45	
Zonas comunes primeros pisos	\$ 188.263,55	\$ 186.960,19	\$ 1.303,36	0,69%	\$ 651,68	
Salón comunal	\$ 494.346,26	\$ 500.718,56	\$ 6.372,30	1,29%	\$ 3.186,15	
Plataforma 1	\$ 363.674,70	\$ 351.656,58	\$ 12.018,12	3,30%	\$ 6.009,06	
Excavaciones y rellenos	\$ 231.051,45	\$ 238.163,75	\$ 7.112,30	3,08%	\$ 3.556,15	

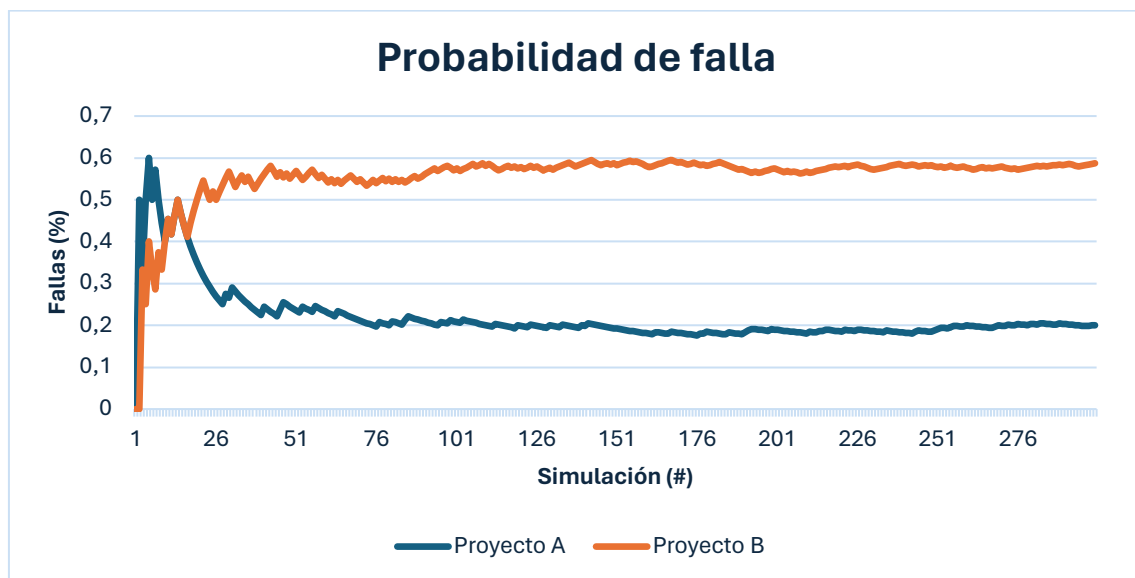
<b>Proyecto B</b>						
Capítulo	Costo promedio proyectado	Costo promedio ejecutado	Variación	Porcentaje	Desviación estándar	
Cimentación	\$ 1.707.361,03	\$ 1.651.212,91	\$ 56.148,11	3,29%	\$ 28.074,06	
Estructura	\$ 1.707.043,26	\$ 1.673.704,36	\$ 33.338,90	1,95%	\$ 16.669,45	
Formaletas	\$ 228.366,77	\$ 239.008,96	\$ 10.642,19	4,66%	\$ 5.321,09	
Hierro	\$ 983.546,10	\$ 993.188,71	\$ 9.642,61	0,98%	\$ 4.821,30	
Cubierta	\$ 245.171,52	\$ 237.928,55	\$ 7.242,98	2,95%	\$ 3.621,49	
Impermeabilizaciones	\$ 103.510,05	\$ 107.643,65	\$ 4.133,59	3,99%	\$ 2.066,80	
Mampostería	\$ 204.874,39	\$ 196.740,67	\$ 8.133,72	3,97%	\$ 4.066,86	
Pañetes	\$ 110.856,56	\$ 110.548,22	\$ 308,34	0,28%	\$ 154,17	
Pisos	\$ 116.241,46	\$ 115.445,72	\$ 795,75	0,68%	\$ 397,87	
Instalaciones hidrosanitarias	\$ 780.713,41	\$ 736.821,12	\$ 43.892,28	5,62%	\$ 21.946,14	
Aparatos sanitarios	\$ 96.105,13	\$ 94.753,25	\$ 1.351,88	1,41%	\$ 675,94	
Instalación eléctrica	\$ 1.099.412,87	\$ 1.106.522,40	\$ 7.109,54	0,65%	\$ 3.554,77	
Carpintería madera	\$ 74.348,88	\$ 76.759,66	\$ 2.410,78	3,24%	\$ 1.205,39	
Carpintería metálica	\$ 756.510,79	\$ 718.382,65	\$ 38.128,14	5,04%	\$ 19.064,07	
Pintura	\$ 73.842,40	\$ 74.105,95	\$ 263,55	0,36%	\$ 131,77	
Cerradura y espejos	\$ 19.646,67	\$ 20.698,15	\$ 1.051,48	5,35%	\$ 525,74	
Cocinas	\$ 166.129,27	\$ 166.603,92	\$ 474,66	0,29%	\$ 237,33	
Equipos especiales	\$ 231.664,52	\$ 233.250,41	\$ 1.585,89	0,68%	\$ 792,95	
Aseo	\$ 64.184,90	\$ 65.051,61	\$ 866,71	1,35%	\$ 433,36	
Urbanismo interno	\$ 222.389,05	\$ 211.640,25	\$ 10.748,80	4,83%	\$ 5.374,40	



Urbanismo interior - redes hys	\$	378.184,32	\$	375.816,02	\$	2.368,30	0,63%	\$	1.184,15
Urbanismo interior - redes elec	\$	664.541,54	\$	657.632,07	\$	6.909,47	1,04%	\$	3.454,74
Zonas comunes primeros pisos	\$	168.303,84	\$	171.035,23	\$	2.731,40	1,62%	\$	1.365,70
Salón comunal	\$	440.477,29	\$	433.086,74	\$	7.390,56	1,68%	\$	3.695,28
Plataforma 1	\$	319.720,64	\$	318.474,27	\$	1.246,37	0,39%	\$	623,18
Excavaciones y rellenos	\$	210.068,21	\$	204.402,73	\$	5.665,48	2,70%	\$	2.832,74

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos mediante el método Monte Carlo aplicado a los proyectos A y B. En el proyecto A, se definió una función de estado límite de \$12.426.528,82 USD, que representa la sumatoria del costo planeado de todas las actividades de construcción establecido al inicio de la obra. Este valor es el costo máximo permitido según el presupuesto inicial. Durante las simulaciones, cualquier escenario en el que el costo total de las actividades superara este umbral se consideró como una falla. El análisis reveló una probabilidad de falla de aproximadamente 20,7%, lo que indica una confiabilidad presupuestal del 79,3%. Esto significa que, en el 79,3% de las simulaciones, los costos se mantuvieron dentro del presupuesto planeado, mientras que el 20,7% restante excedió el límite establecido.

De manera similar, para el proyecto B estableció una función de estado límite de \$ 11.173.214,87 USD. Las simulaciones que superaron este valor se consideraron fallidas. Notablemente, se logró una menor confiabilidad presupuestal del 41,9%, con alrededor del 58,1% de las simulaciones que excedieron el costo planificado. Los resultados indican que el proyecto A, caracterizado por la implementación de estrategias de gestión como el Last Planner System y métodos de construcción industrializada, superó al proyecto B. El proyecto B, que se basó en procesos de planificación basados en CPM y un enfoque de construcción tradicional sin industrialización, mostró un menor nivel de confiabilidad presupuestal, quedando por detrás del proyecto A en aproximadamente un 38%.



**Figura 2.** Probabilidad de falla en el presupuesto.

Estos hallazgos demuestran consistencia con los resultados obtenidos en la revisión bibliográfica referente a las ventajas de la industrialización en la confiabilidad presupuestal. La Tabla 4 presenta el resumen final de la probabilidad de falla para cada tipo de proyecto. Es evidente que el proyecto A demuestra el más alto nivel de

desempeño, mientras que el proyecto B exhibe el comportamiento menos confiable. Estos resultados destacan el impacto positivo de la sinergia entre estrategias de gestión basadas en los principios de Lean Construction y los métodos de construcción industrializada en la confiabilidad presupuestal minimizando la variabilidad del proceso. Por el contrario, cuando los proyectos implementan únicamente metodologías de construcción tradicionales con sistemas de gestión basados en CPM, su desempeño disminuye en aproximadamente un 38% en comparación con los casos industrializados.

**Tabla 4.** Resumen confiabilidad presupuestal

	<b>Proyecto A (Industrializado)</b>	<b>Proyecto B</b>
<b>Confiabilidad Presupuestal</b>	79,3%	41,9%

## DISCUSIÓN

La variabilidad en los costos de ejecución de las actividades de construcción desempeña un papel crucial en la determinación de la confiabilidad presupuestal de proyectos (Salhab et al., 2022). Controlar la variabilidad y reducir la desviación estándar de los costos de las actividades contribuye a mejorar la confiabilidad presupuestal. Además, existe una relación cuantificable entre los sistemas de construcción industrializados y la variabilidad en el costo de las actividades en los proyectos de construcción (Arashpour & Arashpour, 2015). Esto subraya la importancia de la interacción entre los métodos de construcción y la influencia sobre la confiabilidad presupuestal.

Además, el análisis de la variabilidad en el costo de ejecución de las actividades juega un papel fundamental en la evaluación integral de los diversos riesgos asociados con la planificación de la construcción y su sostenibilidad financiera (Zhang et al., 2017). El empleo de un análisis cuantitativo riguroso y simulaciones numéricas avanzadas utilizando parámetros estadísticos permite identificar variables críticas dentro de la planificación de la construcción mientras se predicen con precisión posibles fuentes de incertidumbre y riesgo a nivel de costos (González et al., 2010).

Este estudio muestra que el exceso de variabilidad en los costos de ejecución aumenta la probabilidad de fallos o sobrecostos. Una alta desviación estándar en los costos de las actividades incrementa significativamente el riesgo de fallos en la planificación, como se muestra en la fase de resultados. Un análisis riguroso de la confiabilidad permite identificar claramente las actividades o etapas en la cadena de producción donde el proceso de construcción está sujeto a mayores riesgos e incertidumbres, facilitando la toma de decisiones y la mitigación de impactos (Wang et al., 2019).

En este estudio, se empleó un proceso de selección paso a paso para asegurar la validez y significancia de la comparación entre los dos proyectos. Los dos proyectos fueron realizados por la misma empresa, utilizando los mismos recursos, mano de obra, tecnología y experiencia en diseño arquitectónico. Esto facilitó comparaciones significativas al aislar el impacto del sistema de planificación y el método de construcción industrializado. Como resultado, se cuantificó la influencia de los sistemas industrializados en la confiabilidad presupuestal en dos estudios de caso realizados en Colombia, con un enfoque en la programación de la construcción como factor crítico en el rendimiento financiero.

La influencia de la industrialización como una herramienta para estandarizar prácticas de construcción tienen un notable impacto en la confiabilidad de los proyectos (Kim & Ballard, 2010). Esta investigación mostró que ciertas estrategias de gestión de producción y prácticas específicas de construcción pueden mejorar el rendimiento general de los proyectos. Este impacto es cuantificable y facilita la toma de decisiones asertivas centradas en minimizar riesgos.

Si bien es esencial reconocer que este estudio se limita a un pequeño número de estudios de caso, es importante situar los hallazgos en el contexto de la literatura existente. Investigaciones teóricas anteriores ya han destacado el impacto positivo de la construcción industrializada en el rendimiento general del proyecto (Ekanayake et al., 2021; Wuni & Shen, 2020). Estos estudios proporcionan información valiosa y evidencia matemática que respalda las ventajas de los métodos de construcción industrializada. Este estudio se alinea con estos postulados, reforzando aún más la relación entre metodologías de construcción y confiabilidad de la planificación (J. Zhang et al., 2020).

Los hallazgos de esta investigación contribuyen al cuerpo de conocimientos existente al proporcionar evidencia empírica de la relación entre sistemas de construcción y la confiabilidad presupuestal. Los resultados destacan la importancia de incorporar sistemas de construcción industrializada con innovaciones tecnológicas y procedimentales, como se demostró en el desempeño superior del proyecto A. Este estudio de caso mostró desviaciones estándar controladas y una variabilidad reducida en la presupuestación, lo cual se atribuye a los efectos de una adecuada implementación de estrategias de construcción industrializada (Koskela et al., 2019).

Los resultados sugieren que proyectos como el A, que emplean sistemas industrializados, pueden demostrar un mejor rendimiento en comparación con los métodos no industrializados. Aunque esto está respaldado por la literatura existente (Lerche et al., 2020; Olivieri et al., 2019), es importante destacar que la generalización de estos hallazgos debe interpretarse con precaución debido al número limitado de estudios de caso analizados en esta investigación.

Por otro lado, dentro de las actividades analizadas en los dos proyectos, se observó que las actividades de cimentación e instalaciones hidrosanitarias presentaron una mayor variación en sus costos de ejecución. Estas actividades, caracterizadas por desviaciones estándar más altas, tuvieron el efecto más significativo en la confiabilidad presupuestal. A medida que aumentaba la desviación estándar, empeoraba la variabilidad en la ejecución y, por lo tanto, la confiabilidad presupuestal. Estos hallazgos subrayan la importancia de gestionar efectivamente estas actividades para mitigar riesgos y mejorar el rendimiento general del proyecto a nivel financiero.

En general, los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones prácticas para los profesionales de la construcción y lo interesados en gestión de proyectos. Al comprender la relación entre la variabilidad del proyecto, la evaluación de riesgos y la confiabilidad presupuestal, los practicantes de la industria pueden tomar decisiones informadas e implementar estrategias que mejoren el rendimiento del proyecto. La confiabilidad presupuestal emerge como un concepto fundamental en la gestión de riesgos, la toma de decisiones, la mejora continua, la innovación y los objetivos de seguridad en proyectos de construcción. Aportando significativamente a la sostenibilidad financiera de los proyectos.

## CONCLUSIONES

Este estudio tuvo como objetivo evaluar cuantitativamente el impacto de la variabilidad y la estandarización en la confiabilidad presupuestal de proyectos en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción. Los resultados muestran una fuerte correlación entre la implementación de estrategias de industrialización y una notable reducción en la probabilidad de sobrecostos. El proyecto que incorporó estas estrategias logró una baja tasa promedio de sobrecostos de solo el 20,1% de las veces, superando a los proyectos tradicionales gestionados a través del Método de la Ruta Crítica (CPM) y sin industrialización en sus procesos. Por el contrario, el proyecto con procesos de estandarización deficientes y una industrialización limitada mostró niveles más altos de variabilidad y tenía un 38% más de probabilidades de experimentar sobrecostos en comparación con sus contrapartes industrializadas. Estos hallazgos subrayan la importancia de sistemas de gestión efectivos y el nivel de industrialización en proyectos de construcción para garantizar la confiabilidad de la presupuestación.

Además, el estudio identificó que los proyectos tradicionales tienden a tener costos promedio más variables para sus actividades, desviaciones estándar más altas en los costos de las actividades y una probabilidad significativamente mayor de sobrecostos en el proyecto. Especialmente, las actividades relacionadas con cimentaciones e instalaciones hidrosanitarias surgieron como los principales factores que influyen en la confiabilidad presupuestal en los dos proyectos analizados, exhibiendo una mayor variabilidad. Sin embargo, es crucial reconocer las limitaciones del estudio, ya que solo analizó dos estudios de caso y no proporciona una metodología universalmente aplicable para evaluar proyectos de construcción.

Los resultados obtenidos de los modelos de simulación numérica indican que existe una relación evidente entre la implementación de métodos específicos de construcción industrializada con el rendimiento final del proyecto. Esta relación cuantificable permite caracterizar las fases específicas del proceso de construcción que representan un mayor riesgo para el cumplimiento de la planificación financiera y facilita la toma de decisiones centrada en la mejora continua.

Este estudio se centró únicamente en dos casos de estudio, lo cual limita la capacidad de generalizar los resultados a una gama más amplia de proyectos de construcción. Para mejorar la robustez y generalización de los hallazgos, futuras investigaciones deberían ampliar el tamaño de la muestra para incluir una gama más diversa de contextos de proyectos. Sin embargo, tenemos implicaciones prácticas notables. Los hallazgos subrayan la importancia de implementar estrategias de industrialización para reducir la probabilidad de sobrecostos. En proyectos industriales, se recomienda considerar una contingencia del 10% al 15% en el presupuesto, especialmente para actividades críticas como excavación e instalaciones sanitarias, donde la variabilidad es mayor. Esta medida puede ayudar a gestionar de manera más efectiva los riesgos asociados con la falta de estandarización y los imprevistos durante la ejecución.

Además, se justifican investigaciones adicionales sobre los mecanismos específicos a través de los cuales los sistemas de gestión influyen en la reducción de la variabilidad y la confiabilidad de la planificación financiera. Este esfuerzo de investigación puede avanzar mediante el desarrollo de modelos de análisis numéricos completos que puedan aplicarse universalmente a proyectos de construcción. Un ejemplo de estudio futuro

podría ser la aplicación de modelos de análisis numérico a proyectos en diferentes etapas de industrialización para desarrollar una metodología más robusta y generalizable. Este enfoque puede facilitar la toma de decisiones y mejorar la precisión en la planificación financiera en proyectos de construcción.

Tales modelos ofrecerían un marco metodológico para analizar la confiabilidad, realizar evaluaciones de riesgos, facilitar la toma de decisiones informadas y mitigar efectivamente la incertidumbre para los gerentes de proyecto. Al consolidar una herramienta genérica, este estudio contribuye al avance del campo de la ingeniería y gestión de la construcción y allana el camino para exploraciones adicionales en la evaluación y mejora de la confiabilidad de la planificación de proyectos.

## REFERENCIAS

- Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk Management in the Construction Industry Using Combined Fuzzy FMEA and Fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 1028–1036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000210](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000210)
- Arashpour, M., & Arashpour, M. (2015). Analysis of Workflow Variability and Its Impacts on Productivity and Performance in Construction of Multistory Buildings. *Journal of Management in Engineering*, 31(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000363)
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Ballesteros-Pérez, P., Sanz-Ablanedo, E., Soetanto, R., González-Cruz, Ma. C., Larsen, G. D., & Cerezo-Narváez, A. (2020). Duration and Cost Variability of Construction Activities: An Empirical Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001739)
- Barraza, G. A., Back, W. E., & Mata, F. (2004). Probabilistic Forecasting of Project Performance Using Stochastic S Curves. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 25–32. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(25\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(25))
- Castillo, G., Alarcón, L. F., & González, V. A. (2015). Implementing Lean Production in Copper Mining Development Projects: Case Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000917](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000917)
- Echard, B., Gayton, N., & Lemaire, M. (2011). AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation. *Structural Safety*, 33(2), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.01.002>
- Ekanayake, E. M. A. C., Shen, G. Q. P., & Kumaraswamy, M. M. (2021). Identifying supply chain capabilities of construction firms in industrialized construction. *Production Planning & Control*, 32(4), 303–321. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1732494>
- Erik Eriksson, P. (2010). Improving construction supply chain collaboration and performance: a lean construction pilot project. *Supply Chain Management: An International Journal*, 15(5), 394–403. <https://doi.org/10.1108/13598541011068323>
- González, V., Alarcón, L. F., Maturana, S., Mundaca, F., & Bustamante, J. (2010). Improving Planning Reliability and Project Performance Using the Reliable

- Commitment Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1129–1139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000215)
- Gonzalez, V., Alarcon, L. F., & Mundaca, F. (2008). Investigating the relationship between planning reliability and project performance. *Production Planning & Control*, 19(5), 461–474. <https://doi.org/10.1080/09537280802059023>
- Heigermoser, D., García de Soto, B., Abbott, E. L. S., & Chua, D. K. H. (2019a). BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management. *Automation in Construction*, 104, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.019>
- Kedir, F., & Hall, D. M. (2021). Resource efficiency in industrialized housing construction – A systematic review of current performance and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125443>
- Kim, Y.-W., & Ballard, G. (2010). Management Thinking in the Earned Value Method System and the Last Planner System. *Journal of Management in Engineering*, 26(4), 223–228. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000026)
- Koskela, L., Ferrantelli, A., Niiranen, J., Pikas, E., & Dave, B. (2019). Epistemological Explanation of Lean Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001597](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001597)
- Laufer, A., Tucker, R. L., Shapira, A., & Shenhar, A. J. (1994). The multiplicity concept in construction project planning. *Construction Management and Economics*, 12(1), 53–65. <https://doi.org/10.1080/01446199400000007>
- Lerche, J., Neve, H. H., Ballard, G., Teizer, J., Wandahl, S., & Gross, A. (2020). Application of Last Planner System to Modular Offshore Wind Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001922)
- Lindhard, S. M., Hamzeh, F., Gonzalez, V. A., Wandahl, S., & Ussing, L. F. (2019). Impact of Activity Sequencing on Reducing Variability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001618](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001618)
- Liu, M., Ballard, G., & Ibbs, W. (2011). Work Flow Variation and Labor Productivity: Case Study. *Journal of Management in Engineering*, 27(4), 236–242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000056)
- Olivieri, H., Seppänen, O., Alves, T. da C. L., Scala, N. M., Schiavone, V., Liu, M., & Granja, A. D. (2019). Survey Comparing Critical Path Method, Last Planner System, and Location-Based Techniques. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001644](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001644)
- Poshdar, M., González, V. A., Raftery, G. M., & Orozco, F. (2014). Characterization of Process Variability in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000901](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000901)
- Qi, B., Razkenari, M., Costin, A., Kibert, C., & Fu, M. (2021). A systematic review of emerging technologies in industrialized construction. *Journal of Building Engineering*, 39, 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102265>
- Rahman, S., & Xu, H. (2004). A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(4), 393–408. <https://doi.org/10.1016/j.probenmech.2004.04.003>
- Salhab, D., Møller, D. E., Lindhard, S. M., Hamzeh, F., Randrup, M., & Pilgaard, A. (2022). Accounting for Variability: Identifying Critical Activities as a Supplement to the Critical Path. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002266](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002266)

- Taylor, J. E., Dossick, C. S., & Garvin, M. (2011). Meeting the Burden of Proof with Case-Study Research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(4), 303–311. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000283)
- Thomas, H. R., Horman, M. J., de Souza, U. E. L., & Zavřski, I. (2002). Reducing Variability to Improve Performance as a Lean Construction Principle. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(2), 144–154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:2\(144\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:2(144))
- Tommelein, I. D. , R. D. R. , and H. G. A. (1997). Parade game: Impact of work flow variability on trade performance. In *Constr. Eng. Manage.* (Vol. 125, Issue 5, pp. 304–310).
- Vásquez-Hernández, A., Ortega, J., Giménez, Z., & Alarcón, L. F. (2022). Method of Industrialization Potential Analysis of Construction Systems. 433–444. <https://doi.org/10.24928/2022/0147>
- Wang, M., Deng, Y., Won, J., & Cheng, J. C. P. (2019). An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS. *Automation in Construction*, 107, 102931. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102931>
- Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. (2020). Critical success factors for management of the early stages of prefabricated prefinished volumetric construction project life cycle. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9), 2315–2333. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0534>
- Zhang, J., Li, H., Golizadeh, H., Zhao, C., Lyu, S., & Jin, R. (2020). Reliability evaluation index for the integrated supply chain utilising BIM and lean approaches. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(5), 997–1038. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2018-0542>
- Zhang, L., Wu, X., Zhu, H., & AbouRizk, S. M. (2017). Perceiving safety risk of buildings adjacent to tunneling excavation: An information fusion approach. *Automation in Construction*, 73, 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.09.003>