

Caamaño, L., Jiménez, J., & Prieto, A. (2024). Inteligencia Artificial para la optimización de la toma de decisiones temprana de uso de Métodos Modernos de Construcción en proyectos de vivienda en Chile. En Herrera, R.F., Salazar, L.A., (Editores), *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Gestión y tecnología de la Construcción (IX ELAGEC2024)*.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES TEMPRANA SOBRE EL USO DE MÉTODOS MODERNOS DE CONSTRUCCIÓN EN PROYECTOS DE VIVIENDA EN CHILE

Leonardo Caamaño J. ¹ – lcaamano@cdt.cl

Andrés Prieto I. ² – andres.prieto@uc.cl

José Luis Jiménez ³ – jljimenez@cdt.cl

¹Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, |
Corporación de Desarrollo Tecnológico de Chile (CDT), Santiago, Chile.

² Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile,
Santiago, Chile.

³ Corporación de Desarrollo Tecnológico de Chile (CDT) | Comisión de productividad Cámara
Chilena de la Construcción (CChC), Santiago, Chile.

RESUMEN

Los métodos modernos de construcción (MMC), son una gran oportunidad ante el estancamiento de la productividad del sector construcción, ofreciendo ventajas como menor incertidumbre en plazos y costos, menores residuos, entre otros. En Chile, la adopción de MMC es baja debido a la falta de información y baja integración temprana de estos métodos, lo cual genera subjetividad en la toma de decisiones. El proyecto OptimizIA desarrollado por CDT propone un modelo de inteligencia artificial para predecir y recomendar las soluciones MMC más adecuadas según las condiciones específicas de los proyectos, facilitando la toma de decisiones en fases tempranas. Los resultados de los pilotajes realizados con 9 proyectos mostraron una efectividad general positiva, con un 77,7% de coincidencias exactas o parciales entre los MMC utilizados históricamente por las empresas y los recomendados por el modelo y reportando experiencias positivas de uso, sugiriendo que OptimizIA tiene un potencial significativo para guiar la selección de MMC de manera efectiva.

PALABRAS CLAVE

Métodos modernos de construcción; Inteligencia Artificial; Industria 4.0; Integración Temprana; Toma de Decisiones

1. INTRODUCCIÓN

El sector de arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) es un importante motor de la economía mundial (Egwim et al., 2021), representando aproximadamente el 13% del producto interno bruto global con una promesa de alrededor del 85% (15.5 mil millones de dólares estadounidenses) a nivel mundial para el año 2030 (Babalola et al., 2019). Sin embargo, tanto a nivel mundial como en Chile, ha experimentado un notable estancamiento en términos de productividad.

A nivel global, la productividad en el sector de la construcción ha sido una preocupación constante. McKinsey & Company (2017), afirma que la productividad en la construcción ha crecido solo un 1% anual durante las últimas dos décadas, en comparación con un crecimiento del 2.8% en el sector manufacturero y del 3.6% en la economía mundial en su conjunto.

Según un informe de productividad en el sector construcción, desarrollado por la consultora Matrix para la Cámara Chilena de la Construcción (CChC), entre los años 2000 y 2018, la productividad laboral en Chile aumentó un 20%, mientras que la industria de la construcción no mostró avances significativos. Este estancamiento se debe a diversos factores, incluyendo la ejecución ineficiente, la limitada adopción de tecnologías, metodologías constructivas obsoletas y la falta de mano de obra especializada.

En Chile, mejorar la productividad de la construcción es esencial no solo para mantener la competitividad sino también para lograr una industria más sostenible y eficiente. La adopción de nuevas tecnologías y metodologías constructivas es fundamental para superar los desafíos actuales y asegurar un futuro próspero para la industria (Matrix, 2020). En este contexto, los Métodos Modernos de Construcción (MMC) están ganando popularidad como una alternativa a la construcción tradicional. Sin embargo, como se observa en la figura 1, en Chile existe una baja adopción de MMC complejos, lo cual puede atribuirse a la falta de información detallada y el escaso uso de herramientas avanzadas durante las fases iniciales de los proyectos, dificultando una evaluación objetiva de las alternativas disponibles.

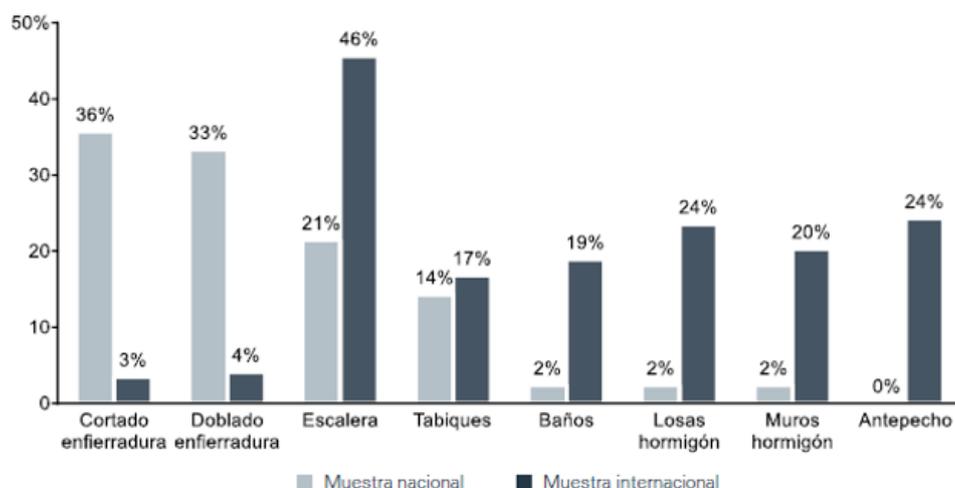


Figura 1. Proyectos de edificación en altura con uso de MMC – Benchmark elaborado por Matrix Consulting (2020)

En paralelo, la inteligencia artificial (IA) se presenta como una herramienta potente para abordar los desafíos del sector. El "Informe Ascendant IA - Sector Construcción" (Ascendant, 2024) destaca que el 83% de las empresas participantes consideran la eficiencia y optimización de los procesos internos como la principal motivación para adoptar IA. Además, el 40% de las compañías destacan la explotación de datos y la toma de decisiones basadas en datos como una de las principales razones para integrar la IA en sus operaciones.

La IA puede transformar el sector de la construcción al mejorar el diseño, la planificación y ejecución de los proyectos. Por ejemplo, los modelos predictivos basados en IA pueden ayudar a identificar posibles retrasos y sobrecostos antes de que ocurran, permitiendo a las empresas tomar medidas preventivas. Además, la IA puede optimizar el uso de materiales y recursos, reduciendo los costos y minimizando el impacto ambiental (Ascendant, 2024).

2. MÉTODOS MODERNOS DE CONSTRUCCIÓN

El concepto MMC es amplio y fue utilizado por primera vez por el gobierno del Reino Unido para describir las innovaciones en la construcción de viviendas (Pan et al., 2017). La primera guía chilena de MMC publicada en 2024 por el Centro Tecnológico de la Construcción (CTEC), los define como métodos que buscan hacer más eficiente el uso de recursos para mejorar la productividad y sustentabilidad de los proyectos de edificación e infraestructura a lo largo de todo el ciclo de vida. Abarcan desde soluciones constructivas, tecnologías, metodologías y procesos que han sido estructurados en siete categorías y que pueden desarrollarse tanto en obra como fuera de ella (ver Figura 2) (CTEC, 2024). Son habilitantes de los MMC, el uso de metodologías como DFMA, BIM y LEAN, así como la aplicación de conceptos de integración temprana, estandarización, medición y mejora continua. Entre los beneficios encontramos el aumento de productividad, versatilidad en el diseño, aumento de la calidad, reducción de imprevistos y accidentes y disminución de residuos, lo cual se traduce en una mayor certeza de costos y plazos.



Figura 2. Diagrama MMC. Elaborado por CTEC a partir de definiciones de Reino Unido y España

Se han realizado diversas investigaciones que han analizado diversos aspectos de los MMC, desde las limitaciones hasta los beneficios, como el impacto en la cadena de suministro (Dowsett et al., 2019), el coste y los plazos de entrega, la reducción de los riesgos laborales (Yu et al., 2019), la sostenibilidad y la productividad (Kamali y Hewage, 2016). Algunos investigadores se han centrado en países concretos (Rahim y Qureshi, 2018) o han limitado su estudio a un método específico o a una etapa del proceso de construcción (Gao et al., 2020). Sin embargo, la adopción de MMC requiere una transformación significativa en la forma en que las empresas de construcción operan, incluyendo la capacitación de la fuerza laboral y la inversión en nuevas tecnologías.

El informe de Matrix (2020), destaca como uno de los mayores obstáculos para la adopción de MMC, la falta de preparación de las empresas. Muchas empresas desconocen las soluciones disponibles y no cuentan con los equipos expertos o la infraestructura necesaria para implementar estos métodos de manera efectiva. Esta falta de preparación genera ineficiencias y afecta la calidad de los proyectos, impidiendo que se visualicen los beneficios reales en productividad y sostenibilidad que ofrecen los MMC.

En este sentido, no existe una metodología capaz de diagnosticar, predecir y recomendar las soluciones MMC más adecuadas, dadas las condiciones de los proyectos particulares, con el fin de facilitar la toma de decisiones durante su concepción y diseño.

3. OPTIMIZIA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA TOMA DE DECISIONES DE MMC

Entre las aplicaciones más prometedoras de la IA en el sector de la construcción se encuentran los modelos de lógica difusa. Estos modelos permiten manejar la incertidumbre y la variabilidad inherentes a los proyectos de construcción, proporcionando recomendaciones precisas y adaptativas para la toma de decisiones. Los

modelos de lógica difusa pueden ser especialmente útiles para seleccionar los MMC más adecuados según las condiciones específicas de cada proyecto y el nivel de preparación de la empresa.

El proyecto desarrollado por CDT en colaboración con la Pontificia Universidad Católica de Chile, denominado OptimizIA, propone un modelo de IA de lógica difusa capaz de predecir y recomendar las soluciones MMC más adecuadas, dadas las condiciones específicas de proyectos, con el propósito de facilitar la toma de decisiones durante su concepción y diseño.

OptimizIA, levanta parámetros sobre las capacidades de la empresa y las condiciones del proyecto, para generar recomendaciones de una combinación de MMC acorde a esos factores entregados. Considera 5 etapas:

- Diagnóstico adopción de MMC: identifica el nivel de preparación de las empresas para utilizar MMC, y así generar una propuesta personalizada para cada empresa acerca su uso. Se definen preguntas relacionadas a los factores habilitantes de los MMC.
- Recomendaciones de mejora a nivel empresa: recomendaciones para mejorar a nivel organizacional los principios evaluados. Tienen un sentido general pero también se busca conectar con herramientas que se han generado para la industria a través de distintas organizaciones.
- Diagnóstico factibilidad en proyectos: identifica el nivel de factibilidad de un proyecto en específico para incorporar MMC. Se definen factores a evaluar, para poder entender cómo, dependiendo de la complejidad de las condiciones del proyecto o necesidades de este y el nivel de preparación organizacional de la empresa, se pueden adaptar mejor algunos MMC que otros.
- Recomendaciones adopción MMC en proyecto: buenas prácticas a considerar al momento de implementarlos en el proyecto.
- Catálogo proveedores de MMC: permite conocer los proveedores nacionales de soluciones de MMC existentes, facilitando conversaciones tempranas.

4. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL MODELO

A continuación, se detalla la metodología para la generación del modelo basado en lógica difusa para predecir el nivel de factibilidad en términos de adopción de MMC considerando diferentes proyectos en el sector de la construcción en Chile. El esquema metodológico principal se define en la Figura 3.

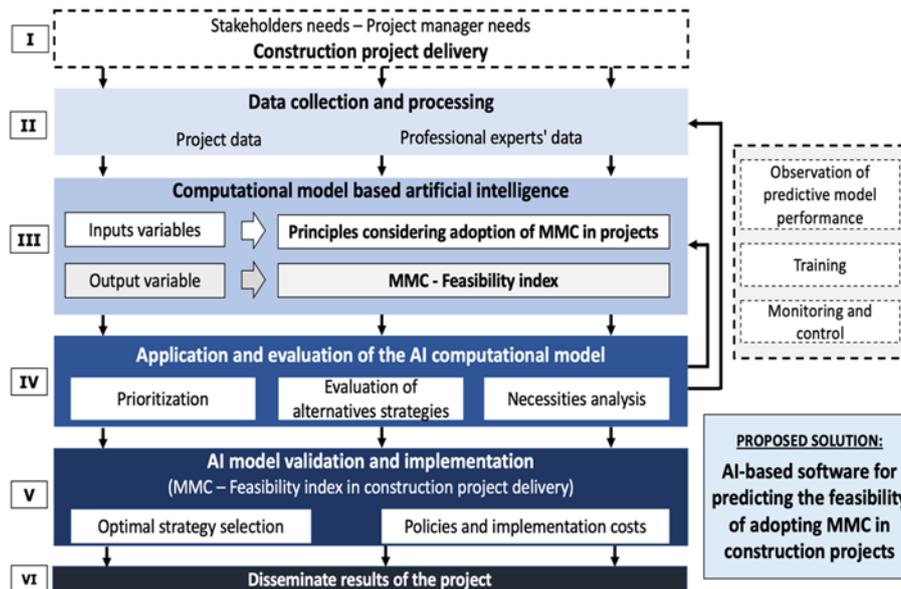


Figura 3. Diagrama de la metodología de desarrollo del modelo OptimizIA.

I. Identificación necesidades de los interesados en el proyecto: el primer paso consiste en identificar las necesidades de los interesados y los gerentes de proyecto en relación con la ejecución de proyectos de construcción en Chile (Aziz y Hafez, 2013).

II. Recopilación y pre procesamiento de datos: los datos de los estudios centrados en el desempeño de los MMC en relación con la ejecución de proyectos de construcción (Tabla 1) provienen principalmente de tres fuentes: datos de proyectos ejecutados, proveedores de soluciones MMC y/o datos de profesionales expertos del sector, a través de grupos colaborativos con entidades asociadas a CChC, CDT y CCI. El paso de pre procesamiento da como resultado un conjunto de datos completo, limpio y adecuado para el proceso de aprendizaje e incorporación al modelo predictivo. Kotsiantis et al (2006) identifica cuatro procesos principales: (i) pre procesamiento de series de tiempo, (ii) muestreo, (iii) datos faltantes y (iv) limpieza de datos.

III. Modelo computacional basado en IA: sistema de inferencia difusa (FIS). En muchos problemas de ingeniería, las partes interesadas se enfrentan a la falta de información y datos incompletos para modelar ciertos fenómenos del mundo real. En este sentido, la incertidumbre es un aspecto que forma parte del conocimiento del que se dispone (Jamshidi y White, 2019). En 1965, se introdujo el principio de la lógica difusa como una herramienta poderosa para lidiar con situaciones que presentan cierto grado de incertidumbre. Estas técnicas utilizan términos lingüísticos para establecer una configuración con el fin de modelar la complejidad de situaciones del mundo real. Los controladores difusos aportan ciertos beneficios a las tecnologías de computación blanda (Marsden, 2019). Por un lado, un sistema de lógica difusa es una forma general de un conjunto nítido que pertenece a un intervalo cerrado entre 0 y 1, donde 1 denota membresía completa y 0 expresa ninguna membresía. Por otro lado, la lógica booleana solo permite dos valores posibles, 0 o 1. Los FIS incluyen cuatro etapas principales (Fayek, 2020): (i) etapa fuzzificación, (ii) base de conocimiento, (iii) motor de inferencia difusa y (iv) etapa defuzzificación.

Etapa de fuzzificación: proceso de convertir valores agudos en grados de pertenencia para términos lingüísticos de conjuntos difusos (Thaker & Nagori, 2018). Los vectores de entrada se pueden traducir a términos lingüísticos, como (i) muy bajo, (ii) bajo, (iii) medio, (iv) alto y (v) muy alto. Las funciones de pertenencia (MF) se utilizan para asociar una calificación a cada término lingüístico (Prieto y Alarcón, 2023).

Tabla 1. Parámetros de entrada del sistema de IA en relación con los principios del proyecto MMC

Categoría	ID	Factores proyecto	Descripción
Preparación empresa habilitantes	PF1	Nivel preparación empresa	Grado de capacidad, experiencia y recursos que tiene una empresa de construcción para implementar y gestionar MMC. Incluye aspectos de evaluación de competencias de roles clave y habilitantes (BIM, DFMA y LEAN).
Condiciones terreno / emplazamiento	PF2	Topografía terreno	La pendiente, elevación y patrones de drenaje de un sitio afectarán el diseño y la construcción del edificio, así como la elección del MMC.
Condiciones terreno / emplazamiento	PF3	Accesibilidad terreno	Facilidad de acceso al sitio de construcción, incluida la disponibilidad de carreteras, enlaces de transporte e infraestructura. La mala accesibilidad puede generar mayores costos y demoras en el transporte de materiales y personal, lo que hace que ciertos MMC sean menos viables.
Condiciones terreno / emplazamiento	PF4	Manejo y almacenamiento en sitio	Disponibilidad de espacio para almacenar materiales y equipos en el sitio de construcción. El espacio de almacenamiento limitado puede requerir métodos de entrega <i>just in time</i> , lo que afecta la elección de la técnica de construcción. Incluye la coordinación y supervisión de las actividades de construcción. La gestión en el sitio es crucial para la implementación exitosa de MMC, que involucran procesos complejos y equipos especializados.
Geometría proyecto	PF5	Tipología proyecto	La clasificación del proyecto de construcción según sus características, como el tipo de estructura (por ejemplo, edificio de gran altura, vivienda unifamiliar, infraestructura) y el uso previsto (residencial, comercial, industrial), es crucial en la elección, ya que cada MMC tiene fortalezas y limitaciones que se adaptan mejor a ciertos tipos de proyectos.

Geometría proyecto	PF6	Altura Dimensiones	Tamaño físico y escala del proyecto. Edificios más altos y estructuras más grandes pueden requerir técnicas de construcción específicas y MMCs que puedan respaldar de manera segura y eficiente el diseño previsto.
Geometría proyecto	PF7	Complejidad diseño	Disposición estética y funcional del edificio. La complejidad y singularidad del diseño arquitectónico pueden determinar la idoneidad de los MMC.
Sostenibilidad proyecto	PF8	Condiciones climáticas	Patrones climáticos y factores ambientales como temperatura, humedad y precipitaciones. Estas condiciones pueden afectar significativamente la viabilidad y el rendimiento de varios métodos de construcción.
Sostenibilidad proyecto	PF9	Comunidades aledañas	Involucrar la dinámica social y cultural de las áreas cercanas al sitio de construcción. La consideración de las necesidades y preocupaciones de la comunidad local puede afectar la elección de los métodos de construcción, especialmente aquellos que minimizan las interrupciones y mejoran la aceptación social.
Sostenibilidad proyecto	PF10	Necesidad de sustentabilidad	Grado en que un proyecto de construcción debe cumplir con estándares ambientales y sostenibles. Incluye la reducción de la huella de carbono, el uso eficiente de recursos, la minimización de residuos, y la incorporación de materiales de bajo impacto ambiental.

Estos métodos asignan un grado de pertenencia a cada elemento del universo U sobre el que se define el conjunto difuso (Carpio et al., 2021). El MF $\mu_A(u)$ del conjunto difuso A puede tomar cualquier valor posible en el rango $[0, 1]$:

$$\mu_A(u): U \rightarrow I[0,1]$$

Fórmula 1

El sistema difuso utiliza el operador “and” como conector que se define como una intersección. Así, dados dos conjuntos A y B , enunciados en sus propios universos de discurso (U), la intersección de estos dos conjuntos es un conjunto difuso $A \wedge B$, cuya función de pertenencia se describe en las ecuaciones (2) y (3) (Cho et al., 2018):

$$\mu_{A \wedge B}(x, y) = T[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Fórmula 2

Fórmula 3

$$T(x, y) = \min [x, y]$$

donde $T(x, y)$ es la T-norma, que cumple con las propiedades conmutativa, asociativa y de monotonía; ver ecuación (3).

El modelo FIS, que considera el nivel de factibilidad de la adopción de MMCs en la ejecución de proyectos de construcción, es capaz de determinar un índice de desempeño de MMC considerando un conjunto de 10 parámetros de entrada (Prieto y Alarcón, 2023): (i) Entradas (PF1-PF10), que se definen en la Tabla 1; (ii) Salida: MMC - Índice de factibilidad (MMC-Fi). Las valoraciones de las 10 variables de entrada se pueden definir en formato cualitativo y/o cuantitativo. El conjunto de variables de entrada del sistema se difumina utilizando funciones de pertenencia triangulares y gaussianas. Estas MF particulares se eligieron para crear un modelo de lógica difusa específico que se centra en el índice de factibilidad MMC. Las variables de entrada y salida tienen etiquetas lingüísticas asociadas. Estas funciones se han probado antes de la definición de modelos de predicción de estrategias de adopción de MMC en la ejecución de proyectos de construcción (Prieto y Alarcón, 2023).

Base de conocimiento y el motor de inferencia difusa: se definen como el núcleo de un modelo difuso, que combina hechos derivados de la etapa de fuzzificación con el conjunto base de reglas de inferencia que se generaron previamente durante la etapa de preprocesamiento de los datos recopilados de la base de conocimiento (datos del proyecto) o por parte del conocimiento generado por profesionales expertos y posteriormente incorporados al proceso de modelado. En lógica difusa, el modelo de tipo Mamdani es uno de los FIS más utilizados que aplica un conjunto de reglas de inferencia difusa proporcionadas por operadores humanos experimentados (Kothamasu & Huang, 2007). Ejemplo de regla de inferencia en la ecuación (4):

Rule (r) = IF X is A and Y is B, ... THEN Z is C

Fórmula 4

Donde A, B y C corresponden a los valores lingüísticos caracterizados por conjuntos difusos. El uso de conjuntos difusos proporciona una generalización del conocimiento utilizado para explicar el rendimiento de todo el sistema. La parte IF de las reglas se define como la premisa (combinaciones de funciones de pertenencia de entrada) y la parte THEN de la regla se define como la consecuencia (MF de salida). El nuevo sistema de predicción difusa incluye un conjunto de más de 180 reglas de inferencia difusa.

Etapas de defuzzificación: se utiliza para obtener los valores que representan los datos difusos producidos por el modelo en la etapa de salida. En este estudio, se adopta el método de centro de área (CoA), que es uno de los métodos más estandarizados y exitosos, en términos de procedimientos de defuzzificación en modelos difusos (Tahera et al., 2008).

En la Ec. (5), se presenta la expresión matemática para la defuzzificación del modelo propuesto, que permite estimar el índice de desempeño lean en la entrega de proyectos de construcción (Ruben et al., 2017).

$$MMC - Fi = \frac{\sum_i y_i \cdot \mu_A (y_i)}{\sum_i \mu_A (y_i)} \quad \text{Fórmula 5}$$

El modelo propuesto proporciona, como resultado, un índice semicualitativo para describir el desempeño funcional de cada sección de muestra de la infraestructura bajo análisis (Pourghasemi et al., 2012), basado en la evaluación de especialistas expertos y en la base de conocimiento de la etapa de recolección de datos. Las condiciones de factibilidad de MMC considerando los factores evaluados, se categorizan de la siguiente manera: A – Factibilidad Alta (color verde), B – Factibilidad Media (color naranja), o C – Factibilidad Baja (color rojo) (ver tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de salida del sistema de IA en relación con la factibilidad de uso de MMC en proyectos.

Nivel	Indicador	Descripción
A	Factibilidad de uso de MMC ALTA	El uso de cualquier MMC es altamente factible. Las condiciones son óptimas, lo que permite una implementación amplia y sin restricciones de MMC.
B	Factibilidad de uso de MMC MEDIA	Existen algunas restricciones para la implementación de MMC. Aunque es viable, la recomendación es más específica y limitada, requiriendo una evaluación cuidadosa para seleccionar la opción más adecuada.
C	Factibilidad de uso de MMC BAJA	Las condiciones presentes son adversas para el uso de MMC. Se recomienda optar por MMC que generen el menor impacto posible, considerando las limitaciones significativas.

Cada nivel descrito, tiene asociada una recomendación de MMC, mediante el relacionamiento de las 7 categorías de MMC con las condiciones de proyectos en que históricamente se ha registrado una mayor valoración y desempeño en los indicadores de productividad y sostenibilidad de los proyectos.

IV. Aplicación y evaluación del modelo computacional de IA: luego del desarrollo del algoritmo de lógica difusa, se evalúan las métricas de desempeño y, realizan cambios incrementales para mejorar el desempeño del modelo (Chatterjee et al., 2019). Con base en la evaluación de las métricas de desempeño, es posible identificar oportunidades de mejora e iniciar un proceso incremental que busque mejorar el desempeño del modelo.

V. Validación e implementación del modelo de IA: al completar todos los pasos anteriores, se realiza una evaluación final utilizando el conjunto de datos de prueba.

5. LEVANTAMIENTO DE DATOS PARA ENTRENAMIENTO DEL MODELO

El proceso de entrenamiento está basado en los datos obtenidos de un levantamiento de información a través de un estudio realizado por la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) en 2023, que involucró la recopilación de datos de 9 empresas inmobiliarias y constructoras, 59 proveedores de MMC y 31 proyectos de vivienda ya

construidos, con el objetivo de conocer factores y condiciones tanto a nivel organizacional como de ejecución y analizar los MMC aplicados con éxito durante sus proyectos.

Entre los resultados del levantamiento, los más relevantes se detallan a continuación:

- El uso de MMC más común en los proyectos levantados corresponden a los MMC6 y MMC3, destacándose los como soluciones más comunes fierros precortados y escaleras prefabricadas (figura 4).
- La etapa del proyecto más común en la que se incorpora al proveedor de MMC fue en la etapa de planificación. Se destaca la baja integración temprana en la etapa de diseño y que mayor sea el porcentaje de integración en la etapa de ejecución (figura 4).
- El porcentaje aproximado del costo total del proyecto, que corresponde al uso de MMC, corresponde en la gran mayoría entre 5% y 15% (figura 4).
- Entre los beneficios de uso más reportados se destacan principalmente la menor generación de residuos y menores emisiones de ruido (figura 5).
- La gran mayoría de los encuestados reportan que debieron capacitar a profesionales y mano de obra para la ejecución del proyecto con MMC (figura 5).

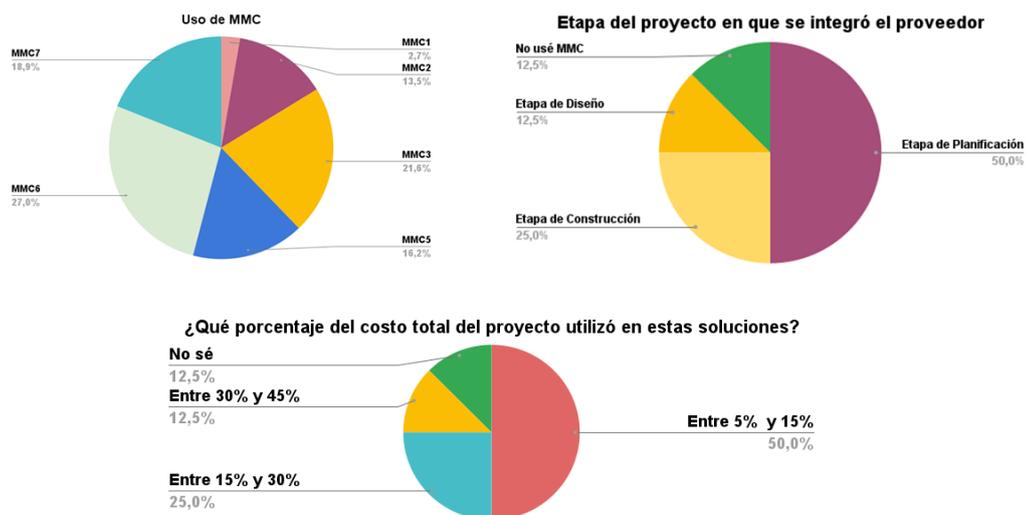


Figura 4. Levantamiento datos sobre uso de MMC en proyectos, parte 1.

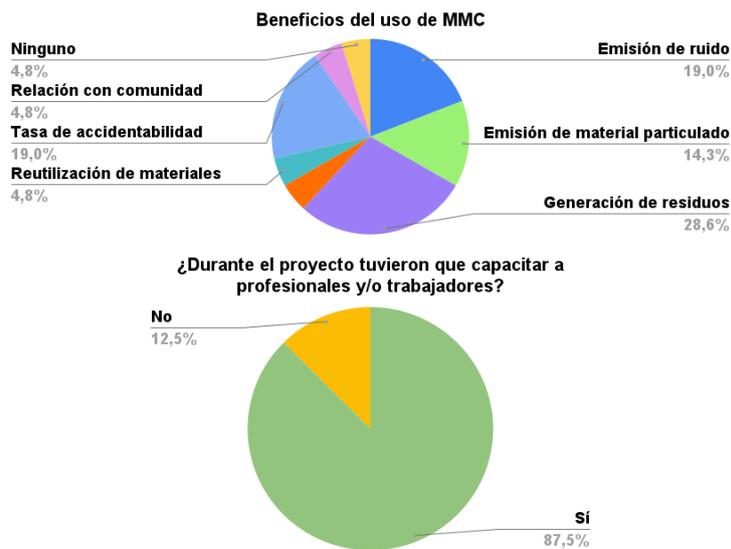


Figura 5. Levantamiento datos sobre uso de MMC en proyectos, parte 2.

En paralelo, se convocó a un panel de expertos del sector, para aplicar la metodología Delphi, con el objetivo de identificar y priorizar los factores clave que influyen en el uso de MMC en proyectos. Este enfoque basado en experiencia permitió determinar los aspectos críticos tanto a nivel organizacional como de ejecución, los cuales son esenciales para la toma de decisiones tempranas en la adopción de MMC. El análisis destacó factores fundamentales que deben considerarse en las primeras fases de concepción del proyecto donde se incluye: el nivel de preparación de la empresa en cuanto a los habilitadores de MMC (DFMA, BIM, LEAN), las condiciones de terreno/emplazamiento, la geometría del proyecto y la sostenibilidad del proyecto.

A partir de lo anterior se determina la relación entre los distintos MMC y los factores relevantes a considerar, incluyendo la regla que permitirá la generación de las reglas de inferencias correspondientes (ver figura 5).

	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4	MMC5	MMC6	MMC7
Factores	 <p>MMC1 MÓDULOS ESTRUCTURALES 3D: Elementos volumétricos Espaciales (3D) que forman parte del sistema estructural.</p>	 <p>MMC2 COMPONENTES ESTRUCTURALES 2D: Elementos planos (2D) estructurales como losas, muros y/o techumbre de diversos materiales.</p>	 <p>MMC3 COMPONENTES ESTRUCTURALES 1D: Partes o componentes estructurales prefabricados que se montan y conectan.</p>	 <p>MMC4 COMPONENTES ADITIVOS: Componentes aislados que pueden ser o no estructurales, y son fabricados mediante procesos de impresión tridimensional y/o manufactura aditiva.</p>	 <p>MMC5 PREFABRICADOS NO ESTRUCTURALES: Componentes prefabricados (unidades volumétricas, panelizados o elementos aislados) que no aportan resistencia estructural al proyecto.</p>	 <p>MMC6 PARTES Y PIEZAS SUSTITUTIVAS: Elementos, partes y piezas que adelantan faenas en obra y que disminuyen los recursos utilizados en los procesos constructivos.</p>	 <p>MMC7 TECNOLOGÍAS SUSTITUTIVAS: Tecnologías para mejorar los procesos contributivos y constructivos en sitio.</p>
Preparación empresa en habilitantes	A preparación media es posible usar el MMC	A muy alta preparación mejor uso del MMC	A preparación media es posible usar el MMC	A muy alta preparación mejor uso del MMC	A muy alta preparación mejor uso del MMC	A preparación baja es posible usar el MMC	A preparación media es posible usar el MMC
Condiciones de terreno / emplazamiento	A complejidad muy alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta mayor es la factibilidad del MMC
Geometría del proyecto	A complejidad muy alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta menor es la factibilidad del MMC	A complejidad alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta mayor es la factibilidad del MMC	A complejidad muy alta mayor es la factibilidad del MMC
Sostenibilidad del proyecto	A necesidad muy alta mayor es el impacto del MMC	A necesidad alta mayor es el impacto del MMC	A necesidad media mayor es el impacto del MMC	A necesidad muy alta mayor es el impacto del MMC	A necesidad media mayor es el impacto del MMC	A necesidad muy alta menor es el impacto del MMC	A necesidad media mayor es el impacto del MMC

Figura 5. Relación MMC con factores de estudio priorizados.

6. PILOTAJE Y RESULTADOS

El pilotaje del modelo consideró el trabajo con 9 empresas, a quienes se le aplicó el OptimizIA considerando la situación de las empresas a nivel organizacional y de un proyecto ejecutado. Los resultados arrojados por el modelo se muestran en la tabla 3 y son comparados con el MMC utilizado en el proyecto histórico evaluado, lo cual muestra la efectividad, definida en tres categorías:

- **Coincidencia Exacta (CE):** el o los MMC utilizados coinciden exactamente con los recomendados por el modelo. Este tipo de coincidencia se observó en 4 de las 9 empresas (Empresa 1, Empresa 4, Empresa 5, Empresa 7), lo que representa un 44,4%.
- **Coincidencia Parcial (CP):** el MMC utilizado incluye al menos uno de los MMC recomendados por el modelo, pero también se utilizaron MMC que no estaban en las recomendaciones. Se observó coincidencia parcial en 3 de 9 empresas (Empresa 6, Empresa 8, Empresa 9), lo que representa un 33,3%.
- **No Coincidencia (NC):** el MMC utilizado no coincide con ninguno de los recomendados por el modelo. Se observó no coincidencia en 2 de las 9 empresas (Empresa 2, Empresa 3), representando un 22,2%.

Es importante destacar que las recomendaciones del modelo no implican que todos los MMC sugeridos deban ser utilizados simultáneamente, sino que se presentan como un conjunto de opciones con mayor factibilidad que pueden ser seleccionadas según las condiciones específicas del proyecto.

Tabla 3. Resultados pilotaje modelo OptimizIA.

EMPRESA	NIVEL DE PREPARACIÓN	COMPLEJIDAD DEL TERRENO	COMPLEJIDAD GEOMETRÍA	SOSTENIBILIDAD PROYECTO	MMC UTILIZADO PROYECTO	MMC OPTIMIZIA NIVEL A	EFFECTIVIDAD MODELO
EMPRESA 1	Muy alto	Muy bajo	Bajo	Muy bajo	MMC1	MMC1, MMC2	CE
EMPRESA 2	Medio	Muy alto	Bajo	Muy bajo	MMC2	MMC3	NC
EMPRESA 3	Alto	Alto	Alto	Muy bajo	MMC5	MMC3	NC
EMPRESA 4	Bajo	Medio	Medio	Muy bajo	MMC6	MMC6	CE
EMPRESA 5	Medio	Medio	Alto	Bajo	MMC3	MMC3, MMC5	CE
EMPRESA 6	Bajo	Alta	Alta	Medio	MMC5, MMC6	MMC6, MMC7	CP
EMPRESA 7	Muy bajo	Medio	Medio	Medio	MMC6, MMC7	MMC6, MMC7	CE
EMPRESA 8	Medio	Medio	Alto	Medio	MMC3, MMC7	MMC3, MMC5	CP
EMPRESA 9	Medio	Alto	Baja	Alto	MMC5, MMC6	MMC3, MMC5	CP

Para complementar los resultados, se aplicó una encuesta de satisfacción a las empresas sobre el uso del MMC escogido en el proyecto estudiado. Para ello se definen 3 posibles resultados:

- **Satisfacción positiva:** empresa percibió beneficios claros y significativos al utilizar el MMC. Estos beneficios pueden incluir mejoras en costos, reducción de plazos, mayor seguridad, mejor calidad en la construcción, reducción de residuos, entre otros.

- **Satisfacción neutra:** empresa reconoció algunos beneficios al utilizar el MMC, pero estos no fueron determinantes ni tuvieron un gran impacto en el proyecto. Es decir, no fueron lo suficientemente significativos como para marcar una diferencia notable en el resultado final.
- **Satisfacción negativa:** empresa experimentó una experiencia insatisfactoria al implementar el MMC. Puede deberse a problemas logísticos, dificultades en la integración temprana, o cualquier otro obstáculo que complejizó el proyecto. En estos casos, el MMC pudo haber generado más desafíos que beneficios, afectando negativamente la percepción de su utilidad.

Tabla 4. Resultados encuesta satisfacción uso MMC en proyectos de estudio piloto.

Empresa	Efectividad modelo	Nivel de satisfacción experimentado	Comentario
Empresa 1	Coincidencia Exacta (CE)	POSITIVA	Visibilizaron beneficios en costos y plazos.
Empresa 2	No Coincidencia (NC)	NEGATIVA	Problemas de integración temprana con arquitecto y proveedor
Empresa 3	No Coincidencia (NC)	POSITIVA	Mejora significativa en calidad y seguridad.
Empresa 4	Coincidencia Exacta (CE)	POSITIVA	Reducción de residuos y mejora en plazos.
Empresa 5	Coincidencia Exacta (CE)	POSITIVA	Beneficios en tiempos y residuos.
Empresa 6	Coincidencia Parcial (CP)	NEGATIVA	Problemas logísticos significativos.
Empresa 7	Coincidencia Exacta (CE)	NEUTRA	Beneficios menores, sin impacto significativo.
Empresa 8	Coincidencia Parcial (CP)	POSITIVA	Mejoras en seguridad y reducción de costos.
Empresa 9	Coincidencia Parcial (CP)	NEUTRA	Beneficios observados, pero no determinantes.

La tabla 4 presenta el resumen de cómo las diferentes empresas valoraron su experiencia al implementar los MMC. Todas las empresas que tuvieron una coincidencia exacta reportaron experiencias positivas o neutras. Sin embargo, 2 empresas experimentaron una experiencia negativa, de las cuales corresponde a una no coincidencia con el modelo (empresa 2) y una coincidencia parcial (empresa 6). En el caso de la empresa 2, a pesar de la gran complejidad de terreno que se declara, utilizaron un MMC2 que dependen bastante de las condiciones del terreno y pueden presentar desafíos importantes en la ejecución del proyecto. En este caso, el modelo recomendaba el uso de MMC3, probablemente por el manejo más flexible al verse enfrentado a terrenos complejos. Por otra parte, la empresa 6 usó MMC 5 y 6, pero tenía altas complejidades de terreno y de geometría del proyecto, mientras que el modelo recomendaba MMC 6 y 7. Se puede

inferir que el uso de MMC5 generó complicaciones logísticas debido a que se debe considerar una buena planificación, principalmente si es una geometría compleja.

7. DISCUSIÓN

El análisis de la relación entre los factores organizacionales y de ejecución con la selección de MMC muestra que la preparación de la empresa y la complejidad del terreno son los factores que más influyen en la factibilidad de implementación de ciertos MMC. Por ejemplo, los MMC6 (Partes y piezas sustitutivas) y los MMC3 (Componentes estructurales 1D) son mayormente seleccionados en contextos donde la preparación de la empresa es baja y la complejidad del terreno es media, lo que sugiere que estos MMC ofrecen una flexibilidad y adaptabilidad que los hace ideales para un amplio rango de proyectos. Por otro lado, MMC más complejos como el MMC1, MMC4 o MMC2, requieren de un nivel de preparación mayor en cuanto a los conocimientos de factores habilitantes de MMC, y poseen mayores restricciones al momento de aumentar las complejidades tanto de terreno o de la geometría del proyecto. Sin embargo, son los que mayor impacto tienen en beneficios en cuanto a sostenibilidad. Este tipo de hallazgos es significativo ya que proporciona una base empírica para recomendar MMC específicos en función de las características del proyecto, lo que puede ayudar a optimizar los resultados tanto en términos de costos como de productividad.

Los resultados del pilotaje del modelo OptimizIA muestran una interesante dualidad en cuanto a concordancias y ciertas discrepancias entre los MMC utilizados por las empresas en los proyectos evaluados y los recomendados por el modelo. Mientras que las empresas tienden a utilizar aquellos MMC que ya conocen y dominan, en ciertos proyectos el modelo sugiere MMC que podrían haber ofrecido mejores resultados en términos de sostenibilidad y eficiencia o, por otra parte, no recomienda ciertos MMC que, si se usaron en la práctica, pero que para las condiciones del proyecto evaluado pueden requerir un esfuerzo mayor o complicaciones en el proceso de implementación, y lo más óptimo sería un MMC de menor complejidad.

Dado lo anterior, resulta fundamental evaluar la satisfacción de las empresas para conocer el beneficio e impacto que tuvo el uso del MMC en el proyecto, y analizar si este tipo de recomendaciones son acertadas en cuanto a la realidad vivida. Las diferencias generadas, pueden deberse a la falta de conocimiento o experiencia con ciertos MMC, lo que subraya la necesidad de una mayor capacitación y difusión de conocimientos dentro del sector, por lo tanto, es crucial incorporar recomendaciones de uso de los MMC, al momento de mostrar los resultados. Además, se destaca la importancia de integrar los MMC desde las primeras etapas del proyecto, especialmente en la fase de diseño, para maximizar el impacto positivo en el proyecto.

8. CONCLUSIONES

La integración de tecnologías avanzadas como la IA y los MMC representa una vía crucial para mejorar la productividad en el sector de la construcción. El modelo OptimizIA no solo ofrece una herramienta innovadora para la toma de decisiones de MMC, sino que también sirve como un precedente para futuras investigaciones y aplicaciones en el ámbito de la construcción, contribuyendo al desarrollo de una industria más productiva y sostenible.

El análisis realizado en esta investigación resalta la importancia de generar un enfoque de integración temprana, objetivo y bien informado, en la selección e implementación de MMC, destacando factores como la preparación de la empresa, la complejidad del terreno, la geometría del proyecto y la sostenibilidad como determinantes en la factibilidad de ciertos MMC, lo que subraya la necesidad de una planificación cuidadosa y una adecuada evaluación de las condiciones del proyecto.

Además, el pilotaje del modelo reveló que, aunque las empresas tienden a confiar en MMC con los que ya están familiarizados, existen oportunidades significativas para mejorar y optimizar los resultados adoptando MMC recomendados por OptimizIA, que permite dar paso a un proceso metodológico de incorporación y adopción de forma informada y objetiva.

De la misma forma, OptimizIA demostró ser una herramienta valiosa para la selección de MMC, mostrando una alta efectividad en la mayoría de los casos estudiados. La coincidencia exacta en un 44,4% de los casos y la coincidencia parcial en un 33,3% indican que el modelo tiene un fuerte potencial para alinearse con las prácticas actuales y mejorar las decisiones en la adopción de MMC. Los resultados de la encuesta de satisfacción complementan estos hallazgos al mostrar que la mayoría de las empresas con coincidencia exacta reportaron experiencias positivas. Esto refuerza la premisa de que una correcta identificación de MMC no solo optimiza la ejecución del proyecto, sino que también mejora la percepción de éxito por parte de las empresas. No obstante, las experiencias negativas reportadas por las empresas 2 y 6, con problemas en integración y logística, respectivamente, ponen en evidencia la importancia de un análisis que incluya las capacidades organizativas y de gestión de cada empresa.

En términos de implicaciones para el sector, la investigación sugiere que las recomendaciones del modelo deben ser vistas como guías flexibles, más que prescripciones rígidas, permitiendo que las empresas adapten las sugerencias a sus contextos específicos considerando la integración desde las primeras etapas del proyecto y promoviendo la capacitación continua de profesionales y mano de obra de terreno, para maximizar los beneficios. Además, futuras investigaciones podrían enfocarse en el acompañamiento de empresas en la implementación de MMC, aplicando el modelo OptimizIA en etapas tempranas, e involucrando las variables de costos y disponibilidad de proveedores cercanos al proyecto, para poder desarrollar estrategias que permitan superar las barreras identificadas, asegurando que el sector de la construcción continúe avanzando hacia un futuro más eficiente y sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestros agradecimientos a la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Comisión de Productividad de la Cámara Chilena de la Construcción (CChC), por el trabajo desarrollado en conjunto, que representa el reflejo de la colaboración entre la Academia y la Industria, y que da como resultado un potente producto de gran impacto y aplicabilidad para la mejora de la productividad y sostenibilidad del sector.

REFERENCIAS

- Ascendant. (2024). Informe Ascendant 2024 IA - Sector Construcción. <https://ascendant.minsait.com/informe-2024-inteligencia-artificial/construccion/>
- Aziz, R. and Hafez, S. (2013) Applying Lean Thinking in Construction and Performance Improvement. Alexandria Engineering Journal, 52, 679-695. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008>
- Babalola, O., Ibem, E. O., & Ezema, I. C. (2019). Lean construction: an approach to achieving sustainable built environment in Nigeria. Journal of Physics.
- Carpio, M., & Prieto, A. J. (2021). Expert panel, preventive maintenance of heritage buildings and fuzzy logic system: An application in Valdivia, Chile. Sustainability, 13(12), 6922. <https://doi.org/10.3390/su13126922>
- Chatterjee, S., Khorana, S., & Kizgin, H. (2022). Harnessing the potential of artificial intelligence to foster citizens' satisfaction: An empirical study on India. Government Information Quarterly, 39(4), 101621. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2021.101621>
- Cho, Y., Kirkewoog, S., & Daim, T. (2018). Managing strategic intellectual property assets in the fuzzy front end of new product development process. R&D Management, 48(3), 354-374. <https://doi.org/10.1111/radm.12312>
- Centro Tecnológico de la Construcción (CTEC) (2024). Guía MMC. Introducción a los Métodos Modernos de Construcción. https://ctecinnovacion.cl/wp-content/uploads/2024/04/2024_-GUIA_MMC_CTEC_CCHC.pdf
- Dallasega, P., Rauch, E., & Matt, D. T. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. Computers in Industry, 99, 205-225. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>
- Dowsett, R., Green, M., Sexton, M. and Harty, C. (2019), Projecting at the project level: MMC supply chain integration roadmap for small housebuilders, Construction Innovation, Vol. 19 No. 2, pp. 193-211. <https://doi.org/10.1108/CI-07-2017-0059>
- Egwim, C. N., Alaka, H., Toriola-Coker, L. O., Balogun, H., & Sunmola, F. (2021). Applied artificial intelligence for predicting construction projects delay. Machine Learning with Applications, 6, 100166.
- Fayek, A. R. (2020). Fuzzy logic and fuzzy hybrid techniques for construction engineering and management. Journal of Construction Engineering and Management, 146(7), 04020064. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001854](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001854)
- Gao, L. X., & Zhang, L. J. (2020). Teacher learning in difficult times: Examining foreignlanguage teachers' cognitions about online teaching to tide over COVID-19. Frontiers in Psychology, 11, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.549653>
- Jamshidi, A., Abbasgholizadeh Rahimi, S., Ait-Kadi, D., & Ruiz, A. (2015). A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices. Applied Soft Computing, 32, 272-283. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.054>

- Kamali, M, Hewage, K. (2016). Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods, J. Clean. Prod. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.108>
- Kosko, B. (1994). The new science of fuzzy logic. HarperCollins.
- Kothamasu, R., & Huang, S. (2007). Adaptive Mamdani fuzzy model for condition-based maintenance. Fuzzy Sets and Systems, 158(24), 2715-2733. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.07.004>
- Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D., & Pintelas, P. E. (2006). Data preprocessing for supervised learning. Data Mining and Knowledge Discovery, 1(2), 111-117.
- Marsden, P. (2019). Digital quality management in construction. Abingdon, UK: Taylor and Francis.
- Matrix Consulting, Cámara Chilena de la Construcción (CChC). (2020). Estudio de productividad: Impulsar la productividad de la industria de la construcción en Chile a estándares mundiales. https://www.matrixconsulting.com/wp-content/uploads/2023/05/ResumenEjecutivo_Estudio_de_Productividad_Construccion2020.pdf
- McKinsey & Company. (2017). Reinventing construction: A route to higher productivity. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com/industries/architecture-engineering-and-construction/our-insights/reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity>
- Pourghasemi, H. R., Yacine, A. (2019). How do machine learning techniques help in increasing the accuracy of landslide susceptibility maps? Geoscience Frontiers, 11(3), 101621. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>
- Prieto A., Alarcon L. (2023). Using Fuzzy Inference Systems for Lean Management Strategies in Construction Project Delivery. JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT 149 9
- Rahim AA, Qureshi SL. (2018). A review of ibs implementation in Malaysia and Singapore. Planning Malaysia. 16 (2):323–333.
- Ruben, B., Asokan, P., & Vinodh, S. (2017). Performance evaluation of lean sustainable systems using adaptive neuro fuzzy inference system: A case study. International Journal of Sustainable Engineering, 10(3), 1-18. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1286409>
- Tahera, K., Ibrahim, R. N., & Lochert, P. B. (2008). A fuzzy logic approach for dealing with qualitative quality characteristics of a process. Expert Systems with Applications, 34(4), 2630-2638. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.05.025>
- Thaker, S., & Nagori, V. (2018). Analysis of fuzzification process in fuzzy expert system. Procedia Computer Science, 132(2), 1308-1316. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.047>

- Tjebane, M., Musonda, I., Okoro, C. (2022). Organisational Factors of Artificial Intelligence Adoption in the South African Construction Industry. *Front. Built Environ.*,8, 823998.
- Yin, X., Liu, H., Chen, Y. and Al-Hussein, M. (2019), “Building information modelling for off-site construction: review and future directions”, *Automation in Construction*, Vol. 101 October 2018, pp. 72-91
- Yu, Y., Chen, Z., & Chen, A. (2019). Experimental study of a pretensioned connection for modular buildings. *Steel and Composite Structures*, 31(3), 217–232. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.31.3.217>