

# Agent based modeling: a tool for construction engineering and management?

## Modelación basada en agentes: ¿una herramienta para la ingeniería y gestión de la construcción?

F. Araya<sup>1</sup>\*, \*\*

\* Universidad de Texas – Austin, EEUU

\*\* Universidad Técnica Federico Santa María – Valparaíso, CHILE

Fecha de Recepción: 07/06/2020

Fecha de Aceptación: 25/07/2020

PAG 111-118

### Abstract

*Construction projects represent complex systems where the interactions between the multiple project resources and stakeholders change over time; however, traditional methods to manage construction projects typically cannot capture such complexity in its totality. Thus, limiting our understanding of such complexity on construction projects. A novel approach used to investigate complex adaptive systems, Agent-based modeling (ABM), allows modeling the interaction between multiple agents that leads to emergent behaviors. As such, this approach represents a feasible modeling technique to study the inherent complexity of construction projects by spending computing resources instead of actual resources, which can be more cost-effective. However, limited attention has been paid to this modeling technique in the construction and management field. This paper aims to discuss guidelines for implementing ABM in the construction sector by discussing its benefits and limitations. It was found that ABM allows the incorporation of otherwise unaccounted complexity associated with construction processes and projects. However, a limitation of ABM is that data to validate models can be difficult to obtain. It is expected that this study helps to encourage the use of ABM in the context of the construction engineering and management field to fully capture the complexity of construction projects and processes.*

**Keywords:** Agent-based modeling; construction engineering and management

### Resumen

Los proyectos de construcción representan sistemas complejos donde las interacciones entre los múltiples recursos del proyecto y las accionistas cambian con el tiempo; sin embargo, los métodos tradicionales para administrar proyectos de construcción generalmente no pueden hacerse cargo totalmente de tal complejidad, limitando nuestra comprensión de tal complejidad en los proyectos de construcción. Un enfoque novedoso utilizado para investigar sistemas adaptativos complejos, es la modelación basada en agentes (MBA), esta permite modelar la interacción entre múltiples agentes que conducen a comportamientos emergentes. Como tal, este enfoque representa una técnica de modelaje factible para estudiar la complejidad inherente de los proyectos de construcción al gastar recursos informáticos en lugar de recursos reales, que pueden ser más rentables. Sin embargo, se ha prestado una atención limitada a esta técnica de modelado en el campo de la construcción y la gestión, este documento tiene como objetivo discutir las pautas para implementar MBA en el sector de la construcción, discutiendo sus beneficios y limitaciones. Se descubrió que MBA permite la incorporación de la complejidad no contabilizada asociada con los procesos y proyectos de construcción. Sin embargo, una limitación de MBA es que los datos para validar modelos pueden ser difíciles de obtener, se espera que este estudio ayude a fomentar el uso de MBA en el contexto del campo de ingeniería y gestión de la construcción para capturar completamente la complejidad de los proyectos y procesos de construcción.

**Palabras clave:** Modelación basada en agentes; construcción ingeniería y administración

## 1. Introducción

Durante el ciclo de vida de un proyecto los proyectos de construcción involucran múltiples participantes (por ejemplo, propietario, diseñador, contratista, subcontratistas) en un entorno dinámico, que influye en el comportamiento de todos los participantes del proyecto y, como tal, los proyectos de construcción se han identificado como sistemas complejos (Walsh et al., 2003). Los sistemas complejos exhiben lo que se conoce como comportamientos emergentes, que resultan de la interacción entre los componentes del sistema y no pueden explicarse solamente por la comprensión de los componentes individuales (Bernhardt y McNeil, 2008); (Macal y North, 2010); (Watkins et al., 2009). Por ejemplo, la productividad en el sitio de construcción ha sido definida por la interacción entre los miembros individuales de la tripulación, los equipos de trabajo, las tareas definidas por el cronograma y las limitaciones de recursos (Watkins et al., 2009).

Múltiples estudios han enfatizado la noción de que los enfoques de modelado existentes utilizados en los proyectos de construcción carecen de la capacidad de capturar las complejidades inherentes asociadas con estos, como la fragmentación y la colaboración del proyecto (Bernhardt y McNeil, 2008); (Liang et al., 2016); (Zhu y Mostafavi, 2017). Curiosamente, un enfoque de modelado que se ha sugerido como capaz de superar esta limitación es la modelación basada en agentes (Hsu et al., 2016); (Osman, 2012); (Liang et al., 2016); (Zhang et al., 2019).

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Universidad de Texas – Austin, EEUU

E-mail: felipe.araya@utexas.edu



La modelación basada en agentes (MBA) es un enfoque ascendente que permite estudiar cómo las reglas y patrones del sistema emergen del comportamiento individual de los agentes, como tal, MBA explica la heterogeneidad de cada agente y permite que los agentes evolucionen y se adapten a las condiciones de su entorno (Watkins et al., 2009). Los estudios existentes han aplicado ABM en proyectos de construcción en diferentes contextos, por ejemplo, para comprender mejor las partes interesadas en los proyectos (gerentes, trabajadores; (Hsu et al., 2016); (Ahn y Lee, 2015), etapas de construcción (operaciones del sitio; (Watkins et al., 2009)) y la complejidad inherente de los proyectos de infraestructura (Osman, 2012). Finalmente, en múltiples estudios, se concluye que se deben realizar esfuerzos para expandir el uso de MBA en la industria de la construcción, ya que la complejidad total observada durante la ejecución de un proyecto puede ser analizado utilizando el enfoque MBA (Liang et al., 2016); (Ren y Anumba, 2004). Sin embargo, también se ha reconocido que debido a la alta complejidad de los problemas en la industria de la construcción, la expansión exitosa y la implementación de MBA en la construcción requiere pautas para facilitar su uso a investigadores y profesionales (Liang et al., 2016); (Ren y Anumba, 2004).

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo evaluar y discutir la literatura existente con respecto a las aplicaciones MBA para proponer recomendaciones y directrices para futuras implementaciones de MBA en proyectos de construcción. En última instancia, este estudio puede facilitar el uso de MBA para investigadores y profesionales de la construcción y así aprovechando esta novedosa técnica, analizar y comprender mejor la complejidad de los proyectos de construcción.

## 2. Investigación de antecedentes

Esta sección discute los conceptos de la modelación basada en agentes como método, y luego las diferentes aplicaciones que se encuentran en la literatura de ingeniería y gestión de la construcción.

### 2.1 Modelación basada en agentes

La modelación basada en agentes es un enfoque para modelar sistemas complejos compuestos de elementos individuales, es decir agentes, que tienen la capacidad de interactuar bajo el mismo entorno (Macal y North, 2010). Los agentes tienen comportamientos individuales que se representan a través de un conjunto de reglas y dan la capacidad de representar completamente la diversidad y la heterogeneidad de los múltiples agentes involucrados en un sistema. Además, como estos agentes heterogéneos son capaces de interactuar bajo el mismo entorno, surge el comportamiento sistémico (Bonabeau, 2002); (Macal y North, 2010). Precisamente, estas dos características, el énfasis en la heterogeneidad de los agentes de modelado y los comportamientos emergentes son características distintivas de MBA como técnica de modelado en comparación con otros métodos, como la simulación de eventos discretos (SED) o la dinámica del sistema (DS) (Macal y North, 2010). En última instancia, el objetivo de MBA no es optimizar un sistema complejo, sino comprender el proceso que puede surgir en un sistema así de complejo. En la (Figura 1) se muestra una representación de cómo los agentes y su comportamiento contribuyen al comportamiento emergente del sistema.

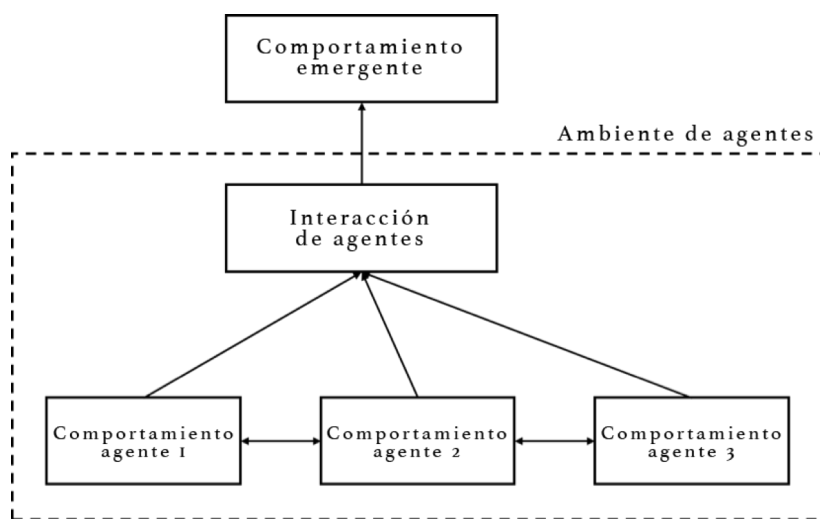


Figura 1. Interacción de los agentes que contribuye al comportamiento emergente del sistema (elaboración propia).



Cuando se trata de los contextos en los que se recomienda (o no se recomienda) el uso de MBA, se ha enfatizado que cuando existen leyes claras de física que rigen, el sistema en estudio no puede funcionar si se elimina un componente o si la incertidumbre que rige las ecuaciones del sistema son muy bajas, en estos casos no es recomendable implementar MBA. Por el contrario, si se recomienda implementar ABM cuando el comportamiento humano es un factor importante en el sistema (como aprender y adaptarse), existen entidades que operan independientemente bajo incertidumbre y hay factores económicos, sociales o políticos involucrados, (Macal y North, 2010); (Walsh et al., 2003). Las aplicaciones de MBA abarcan múltiples áreas y disciplinas, como la biología, el ecosistema y la gestión ambiental, la gestión de los recursos hídricos, las ciencias sociales y la gestión de la construcción (Echaveguren et al., 2017); (Grigoryev, 2012); (Hogeweg y Hesper, 1983); (Lansing y Kremer, 1993); (Liang et al., 2016); (Yazdani et al., 2015). Finalmente, el enfoque de la próxima sección es la implementación de MBA en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción.

## 2.2 MBA en la construcción

Múltiples estudios han implementado MBA en el contexto de la ingeniería y gestión de la construcción. El argumento principal presentado en la literatura para implementar MBA, es el enfoque ascendente de los agentes de modelación (por ejemplo, trabajadores de un equipo de trabajo) de los procesos de construcción facilita la comprensión de la complejidad inherente relacionada con dichos procesos. Curiosamente, los procesos involucrados a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de los proyectos de construcción se han modelado utilizando MBA, por ejemplo, la eficiencia laboral como un comportamiento emergente de las interacciones individuales y del equipo durante las operaciones de construcción (Watkins et al., 2009). En términos de organización de los estudios existentes que la MBA implementa en ingeniería y gestión de la construcción, (Osman, 2012) sugirió que los estudios abarcan cinco categorías: operaciones de sitio, reclamos y negociaciones, asignaciones de recursos, gestión de la cadena de suministro y gestión de la infraestructura. Más recientemente, los investigadores han combinado MBA con otras técnicas de simulación en la construcción, como el modelación de información de construcción (MIC), y como tal, también se discute una sexta categoría que abarca MBA y MIC. En los siguientes párrafos, se discuten los estudios existentes relacionados con estas seis categorías.

### 2.2.1 Operaciones de sitio

Con respecto a las operaciones de sitio, (Watkins et al., 2009) implementando una modelación basada en agentes para estudiar el sitio de construcción, como un sistema complejo enfocado en las interacciones individuales, y de la tripulación para modelar la productividad laboral como una propiedad emergente del sistema. El modelo propuesto por Watkins y sus colegas proporcionó un enfoque ascendente alternativo para comprender la eficiencia laboral, en comparación con los enfoques descendentes para modelar la eficiencia laboral. Cuando se trata de modelar las operaciones del sitio que involucran maquinaria, (Jabri y Zayed, 2017) desarrollaron un modelo de movimiento de tierras basado en agentes que permitió modelar unidades de maquinaria, como excavadoras, cargadores o transportistas, con diferentes especificaciones que realizan la misma tarea (pistas con diferentes capacidades), esto permitió evaluar la interacción de diferentes maquinarias para tareas de movimiento de tierras. Más importante aún, el modelo propuesto permitió a los autores dar cuenta de escenarios especiales de operación de movimiento de tierras con restricciones de recursos.

### 2.2.2 Reclamos y Negociaciones

El proceso de negociación entre múltiples partes en la construcción calza bien con el enfoque centrado en el agente de MBA. Las partes negociadoras pueden entenderse como agentes autónomos, que tienen objetivos diferentes y muchas veces conflictivos (Ren et al., 2003). Por esta razón, los estudios existentes se han centrado en modelar el proceso de negociación de la construcción. Por ejemplo, (Ren et al., 2003) implementaron un enfoque MBA para modelar el proceso de negociación centrado en el proceso de aprendizaje de los agentes. De manera similar, (El-Adaway y Kandil, 2010) propusieron un sistema de resolución de disputas usando MBA, que fue calibrado utilizando 30 disputas de construcción arbitradas. Curiosamente, los resultados del estudio mostraron que el sistema propuesto fue capaz de generar argumentos legales al preparar la defensa de diferentes posiciones en el arbitraje. Consecuentemente, ahorrando tiempo y esfuerzos para debates profesionales relacionados con reclamos y disputas de construcción.

### 2.2.3 Asignación de Recursos

Cuando se trata de la asignación de recursos desde la perspectiva del propietario, Farschian y sus colegas han implementado modelos MBA para estudiar el problema de la asignación del presupuesto en la cartera de proyectos (Farshchian et al., 2017), y el problema de la incertidumbre relacionada con la cartera de proyectos (Farshchian y Heravi, 2018).



En el ámbito de las asignación de recursos durante los proyectos de construcción, (Yang y Mohamed, 2008) propusieron un modelo de asignación de recursos de múltiples agentes (MARA) en el contexto de los procesos de ensamblaje de la construcción industrial. De manera similar, (Taghaddos et al., 2012) implementaron un modelo de asignación de recursos de múltiples agentes (MARA) para programar recursos en un gran proyecto de construcción. Es interesante notar, que se ha propuesto la implementación de modelación basada en agentes, para superar las limitaciones de las técnicas de programación existentes en proyectos de construcción (CPM), como capturar la naturaleza dinámica e incierta de los proyectos de construcción (Taghaddos et al., 2012).

#### **2.2.4 Cadena de Suministro**

Con respecto a la modelación de la cadena de suministro de la construcción utilizando MBA, (Xue et al., 2005) propuso un modelo para estudiar la coordinación de la cadena de suministro de la construcción, a través de un mecanismo de negociación de atributos múltiples representados a través de agentes. Más recientemente, (Gan y Cheng, 2015) propusieron un enfoque de modelado basado en agentes para analizar la cadena de suministro de relleno en la gestión de residuos de la construcción; Además, los autores desarrollaron un modelo de optimización para comparar con la modelación basada en agentes. Curiosamente, (Gan y Cheng, 2015) descubrieron que el enfoque MBA encaja mejor para estudiar la cadena de suministro dinámica de relleno, debido a su enfoque descentralizado y a las capacidades de MBA para adaptarse rápidamente a modificaciones inesperadas del modelo.

#### **2.2.5 Gestión de Infraestructura**

Cuando se trata de los enfoques de modelación con respecto a la gestión de la infraestructura, se ha afirmado que tradicionalmente los enfoques de toma de decisiones no han sido capaces de representar complejidades del proceso de gestión de la infraestructura, por ejemplo, durante el mantenimiento de la infraestructura (Bernhardt y McNeil, 2008 ); (Osman, 2012).

Probablemente, debido a nuestra comprensión limitada del complejo proceso de administración de infraestructura es que hemos observado el deterioro de la infraestructura existente con el tiempo; por ejemplo, en los Estados Unidos, su infraestructura existente se ha calificado de pobre en las últimas décadas (ASCE, 2013); (ASCE, 2017). Este contexto ha obligado a los investigadores y profesionales a buscar nuevos métodos para administrar la infraestructura. Curiosamente, múltiples estudios han afirmado que la implementación de MBA para administrar la infraestructura puede abordar esta limitación (Bernhardt y McNeil, 2008); (Osman, 2012). (Osman, 2012) presentaron un marco MBA para estudiar las interacciones entre usuarios de infraestructura, activos, operadores y políticos. La principal contribución fue demostrar la aplicabilidad del uso de una modelación basada en agentes para representar una interacción compleja entre las múltiples partes interesadas involucradas en el manejo de la infraestructura urbana. Del mismo modo, (Yazdani et al., 2015) propusieron un marco para comprender el papel de la coordinación entre las múltiples agencias involucradas en la provisión de infraestructura a nuevas áreas urbanas. Más recientemente, la MBA también se ha implementado en el contexto de gestión de la infraestructura urbana en respuesta a los desastres migratorios. Más específicamente, en el contexto de la crisis europea de refugiados, (Araya et al., 2020) evaluó el papel de las comunidades que albergan a las poblaciones desplazadas en la provisión de infraestructura urbana para tales personas.

#### **2.2.6 MBA y BIM.**

En los últimos años, los investigadores han comenzado a expandir el uso de la MBA en el ámbito de la ingeniería y gestión de la construcción, con tecnologías ya existentes en la industria de la construcción, como la modelación de información de construcción: BIM (Cheng et al., 2018); (Micolier et al., 2019). BIM es una colección de información visualizada del edificio y, como tal, BIM modela instalaciones sin tener en cuenta el comportamiento humano (Porter et al., 2014). Por lo tanto, la integración de MBA y BIM puede mejorar el rendimiento de los análisis utilizando BIM, al proporcionar una simulación de interacción entre los humanos y el edificio (Liang et al., 2016).

(Shi et al., 2009) propusieron una modelación basada en agentes para estudiar el comportamiento de los ocupantes de un edificio público (como un estadio cubierto) bajo un escenario de incendio. A partir de los resultados del modelo, los autores finalmente propusieron un modelo para la evacuación de incendios. De manera similar, (Cheng et al., 2018) desarrolló un modelo que combina BIM y ABM para simular diferentes planes de evacuación en plataformas de petróleo y gas en alta mar (OOGP). Las simulaciones múltiples con el modelo propuesto, permitieron evaluar diferentes planes de evacuación para mejorar el desempeño de las evacuaciones en OOGP; Además, los autores concluyeron que el modelo era más que transferible a otras industrias que necesitaban investigación de planificación de evacuación, como la industria de la ingeniería y la construcción (Cheng et al., 2018). Cuando se trata de la interacción entre MBA y BIM en entornos residenciales (Micolier et al., 2019) propuso un modelo que tenga en cuenta los atributos de múltiples residentes (comportamiento social, modelo térmico, modelo de confort modelo de toma de decisiones) que interactúan con el modelo BIM. En particular, el modelo



propuesto permitió el estudio del impacto de los diseños de edificios en la comodidad de los ocupantes, y la influencia del comportamiento de los ocupantes en el rendimiento de los edificios (Micolier et al., 2019).

Los investigadores también han implementado la modelación basada en agentes para evaluar la adopción de BIM en proyectos de construcción. Específicamente, explica las interacciones sociales de los participantes involucrados durante el diseño basado en BIM. (Al Hattab y Hamzeh, 2018) modelaron los aspectos sociales de la interacción de las personas con la información intercambiada, al adoptar BIM en un proyecto. Curiosamente, el principal hallazgo de los autores fue que la implementación de BIM no resulta directamente en un mejor proceso de diseño o una mejor calidad. Por el contrario, la implementación exitosa de BIM depende en gran medida de cómo la organización y sus miembros adopten BIM; Los atributos de la organización y los miembros deseables para implementar BIM, fueron la colaboración y una mentalidad abierta para hacer las cosas de manera diferente a los enfoques tradicionales (Al Hattab y Hamzeh, 2018).

### 3. MBA el camino para comprender mejor los proyectos de construcción?

Como se discutió en este estudio, los métodos típicamente utilizados para modelar entornos de construcción han capturado completamente las complejidades inherentes de los proyectos de construcción, existe entonces la necesidad de buscar nuevas técnicas que puedan superar las limitaciones existentes en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción (IGC). Así es como en los últimos años, el enfoque de la modelación basada en agentes (MBA) ha sido implementado por múltiples investigadores y profesionales de IGC, obteniendo resultados prometedores con respecto a la modelación de proyectos de construcción y sus procesos. En general, se ha descubierto que la implementación del enfoque de la modelación basada en agentes (MBA) proporciona múltiples beneficios para el campo de la ingeniería y la gestión de la construcción (IGC), es decir, al modelar el entorno de la construcción como un sistema complejo que permite identificar comportamientos emergentes no detectados de otro modo. No obstante, la implementación de MBA en IGC, también ha identificado algunas limitaciones. (Tabla 1) muestra los principales hallazgos y limitaciones identificados en la revisión de la literatura preparada en este estudio. Las siguientes secciones discuten los principales beneficios, limitaciones y el camino a seguir para la implementación de MBA en el campo IGC.

**Tabla 1.** Resumen de los beneficios de implementar MBA en ingeniería y gestión de la construcción.

<b>Autores</b>	<b>Principales hallazgos</b>	<b>Limitaciones</b>
Watkins et al. (2009)	Interacción de las cuadrillas de trabajadores incluida en la planificación para la congestión de trabajadores	Consideraciones del modelo no son totalmente representativas de las condiciones reales en proyectos de construcción.
Osman (2012)	La interacción entre usuarios, infraestructura, ingenieros, administradores, y tomadores de decisiones puede ser incluida en la gestión de infraestructura.	Modelamiento preciso del comportamiento de los agentes.
Ran and Anumba (2004)	MBA es ideal para la industria de la construcción dada su naturaleza fragmentada.	La capacidad de aprendizaje de los agentes es fundamental para su adaptación en un ambiente que cambia en forma permanente.
Micolier et al. (2019)	MBA permite modelar en comportamiento humano en construcción residencial, que puede ser utilizado como input para modelos BIM.	Comportamiento humano depende de aspectos culturales, y como tal puede variar de acuerdo a la ubicación geográfica.
Liang et al. (2016)	Autonomía, cooperación, y aprendizaje son atributos de los agentes que apoyan el estudio de la colaboración y acuerdos en proyectos de construcción.	Desde la perspectiva de la industria, MBA no es una herramienta estrictamente necesaria aun.





### 3.1 Beneficios del uso MBA en la Construcción

Según la literatura evaluada en este estudio, el uso de MBA en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción representa un paso incremental para capturar la complejidad de los proyectos de construcción como un sistema. Dicha complejidad proviene principalmente del enfoque de modelación ascendente que permite estudiar a las personas involucradas en el proceso de construcción (miembros de la tripulación). En otras palabras, un mejor modelado de los elementos individuales involucrados en los proyectos de construcción durante las diferentes fases del ciclo de vida de un proyecto, permite tener una mejor comprensión de los proyectos de construcción. Tal comprensión de los elementos de los proyectos de la construcción a nivel individual representa un beneficio para los gerentes de construcción, en el sentido de que al comprender mejor estos elementos individuales, es decir, los agentes, los gerentes pueden desarrollar e implementar planes y programas más específicos para mejorar el desempeño de los proyectos de construcción. Por ejemplo, tener una mejor comprensión del papel específico de los miembros de la tripulación y sus interacciones sobre la productividad, puede ayudar a los capataces y gerentes de proyectos a diseñar programas de mejora de la productividad que sean más específicos a nivel de trabajador o tripulación.

Otro beneficio de usar MBA es la naturaleza interactiva y evolutiva de los modelos MBA. Dado que el comportamiento del sistema se simula en función del comportamiento de los componentes individuales del sistema en estudio, se pueden identificar comportamientos emergentes y a menudo inesperados. Más importante aún, tales comportamientos inesperados pueden eventualmente incluirse en futuras versiones de modelación, por lo que el proceso de modelación del sistema en estudio está más cerca de representar las condiciones reales. Es importante notar que MBA no es una herramienta de optimización; Es una herramienta de simulación para comprender la complejidad de los sistemas en estudio, o sea, es posible desarrollar escenarios hipotéticos.

Del mismo modo, otro beneficio del uso de MBA, es que facilita la inclusión de múltiples partes interesadas involucradas en la gestión de proyectos de construcción. Es decir, en los proyectos de infraestructura, a menudo se ha descuidado el papel de las comunidades locales, en los que múltiples casos han tenido consecuencias negativas para tales proyectos, aumento del presupuesto del proyecto, incluso proyectos detenidos. Específicamente, en proyectos de infraestructura, que tienen un componente social mucho más alto en comparación con otros proyectos de construcción privados, el papel que juegan las comunidades locales afectadas por el desarrollo de proyectos de infraestructura es una línea de investigación que necesita más estudios para emprender, y como tal, MBA proporciona una excelente herramienta para hacerlo (Osman, 2012).

Finalmente, aunque no se menciona explícitamente en la literatura, el autor de este estudio sugiere que una de las principales contribuciones de la implementación de MBA en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción (IGC) puede provenir del hecho de que para desarrollar un modelo, es necesario tener principios, una teoría y datos que respalden el desarrollo de dicho modelo. Como tal, los investigadores están comenzando a expandir los modelos existentes y los datos disponibles en el campo de IGC que pueden enriquecer nuestra comprensión. Lo que es más importante, no solo es que ahora hay más datos disponibles con el desarrollo de la modelación basada en agentes, sino que también el nivel de granularidad de datos permite a los investigadores de IGC tener una mejor comprensión de los elementos individuales involucrados en proyectos de construcción, como lo es la tripulación de trabajadores, e incorporar estos elementos en el proceso de modelación.

### 3.2 Desafíos del uso de MBA en la Construcción

Al igual que con cualquier método, la MBA tiene limitaciones o desafíos que los investigadores deben enfrentar y reconocer al usar este método. Durante la formulación de un modelo, el proceso en el cual los elementos y agentes del sistema se abstraen, a veces puede simplificar demasiado las condiciones de la vida real de los proyectos de construcción. Además, como MBA utiliza un enfoque de modelación ascendente, a menudo, los datos necesarios para implementar los modelos pueden no estar siempre disponibles. Sin embargo, teniendo en cuenta que MBA es un método bastante nuevo en IGC, se puede esperar ver datos limitados que se ajusten a este enfoque de modelación específico. Como tal, la implementación de MBA en muchas áreas de IGC puede enfrentar el desafío de la falta de datos para comparar inicialmente los resultados, en cuyo caso, el papel de la validación y verificación de la modelación basada en agentes adquiere una importancia capital.

Los procesos de validación y verificación son fundamentales en cada método de modelación, y especialmente cuando existen datos e información limitada con respecto a un enfoque de modelación particular. Dado este contexto, la verificación y validación de los supuestos y resultados de la modelación basada en agentes por parte de expertos en la materia (PYME) son fundamentales.

En última instancia, como la implementación de MBA es bastante nueva en el campo de IGC, una de las principales limitaciones es la falta de pautas que puedan facilitar su implementación (Liang et al., 2016). Por esto, es necesario comenzar a discutir diferentes formas y enfoques para hacerlo. Si queremos que MBA se use más ampliamente en el campo IGC, será necesario acordar ciertos parámetros comunes que todos los investigadores



pueden usar para comparar y verificar los hallazgos provenientes de modelación en este campo. De lo contrario, será difícil para los investigadores comenzar a implementar MBA.

### 3.3 Recomendaciones al implementar la MBA

Esta sección discute recomendaciones sobre cómo avanzar con respecto a la implementación de MBA en el campo IGC.

- MBA es altamente recomendable como herramienta para modelar problemas que requieren una buena comprensión de los elementos individuales del sistema en estudio, como los miembros de la tripulación durante un programa de mejora de la productividad.
- Se recomienda utilizar MBA, especialmente cuando el componente humano del problema quiere ser explorado. Los ejemplos de hacer que una MBA interactúe con tecnologías existentes en el campo de CEM, como BIM, han demostrado proporcionar información valiosa sobre la interacción entre los usuarios de las instalaciones y los diseños BIM.
- El uso de MBA alienta a los investigadores a usar o desarrollar teorías/principios sobre el problema en estudio, lo que puede enriquecer nuestra comprensión del campo CEM. Especialmente en problemas centrados en la incorporación del componente humano, como la incorporación de comunidades locales en la gestión de proyectos de infraestructura.
- Los procesos de validación y verificación de una MBA (V&V) desempeñan un papel fundamental, ya que este enfoque aún está en desarrollo en el campo de CEM, y aún se necesitan recopilar y desarrollar más datos y modelos. Como tal, los expertos en la materia deben desempeñar un papel activo en la validación y verificación de la modelación basada en agentes.

## 4. Conclusiones

Este estudio explora la literatura existente sobre el uso de MBA en el campo de la ingeniería y gestión de la construcción (IGC). Se discuten los diferentes beneficios y limitaciones identificados en la literatura, para proporcionar recomendaciones a los investigadores y profesionales que deseen implementar una MBA en el futuro.

Este estudio contribuye al analizar los beneficios y las limitaciones existentes de implementar una MBA en el campo de ingeniería y gestión de la construcción (IGC). La MBA permite modelar la interacción entre múltiples elementos individuales de un sistema en estudio, y tales interacciones conducen a comportamientos emergentes dentro del sistema. En consecuencia, MBA representa una técnica de modelación factible para estudiar la complejidad inherente de los proyectos de construcción, que permite el estudio de múltiples escenarios que gastan recursos informáticos en lugar de recursos reales, lo que puede ser más rentable para los profesionales e investigadores de IGC. Del mismo modo, también se discutieron las limitaciones de MBA, como el requisito de datos más granulares a nivel individual y los procesos de validación y verificación de modelos. Finalmente, se descubrió que si queremos que MBA se use más ampliamente en el campo de IGC, será necesario desarrollar más pautas y establecer recomendaciones claras para implementar MBA, y como tal, acordar ciertos parámetros comunes que todos los investigadores pueden usar para comparar y verificar hallazgos provenientes de modelos en el campo IGC. Los estudios futuros deberían contribuir al desarrollo de pautas más detalladas para la implementación de MBA en el campo IGC. Por ejemplo, las mejores prácticas para informar los pasos y resultados de la modelación serían de gran contribución para el campo IGC.

## 5. Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de Conicyt/ANID a través del Programa Becas Chile, número de subvención 72170369.

## 6. Referencias

- Ahn, S.; Lee, S. (2015).** Methodology for creating empirically supported agent-based simulation with survey data for studying group behavior of construction workers. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(1).
- Al Hattab, M., & Hamzeh, F. (2018).** Simulating the dynamics of social agents and information flows in BIM-based design. *Automation in Construction*, 92, 1-22.
- Araya, F.; Faust, K.; Kaminsky, J. (2020).** A Decision-Making Framework for Participatory Planning: Providing Water Infrastructure Services to Displaced Persons. *Construction Research Congress 2020 Proceedings*, Tempe, Arizona, USA, March, 8-10.



- ASCE. (2017). 2017 infrastructure report card. Reston, VA: ASCE.
- ASCE. (2013). 2017 infrastructure report card. Reston, VA: ASCE.
- Bernhardt, K. L.; McNeil, S. (2008). Agent-based modeling: Approach for improving infrastructure management. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(3), 253-261.
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (3), 7280-7287.
- Cheng, J. C.; Tan, Y.; Song, Y.; Mei, Z.; Gan, V. J.; Wang, X. (2018). Developing an evacuation evaluation model for offshore oil and gas platforms using BIM and agent-based model. *Automation in Construction*, 89, 214-224.
- Echaveguren, T.; Chamorro, A.; De Solminihac, H. (2017). Concepts for modeling road asset management systems using agent-based simulation. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(1), 47-56.
- El-Adaway, I. H.; Kandil, A. A. (2010). Multiagent system for construction dispute resolution (MAS-COR). *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(3), 303-315.
- Farshchian, M. M.; Heravi, G. (2018). Probabilistic assessment of cost, time, and revenue in a portfolio of projects using stochastic agent-based simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(5).
- Farshchian, M. M.; Heravi, G.; AbouRizk, S. (2017). Optimizing the owner's scenarios for budget allocation in a portfolio of projects using agent-based simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(7).
- Gan, V. J.; Cheng, J. C. (2015). Formulation and analysis of dynamic supply chain of backfill in construction waste management using agent-based modeling. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4), 878-888.
- Grigoryev, I. (2012). AnyLogic 6 in three days: a quick course in simulation modeling. AnyLogic North America.
- Hogeweg, P.; Hesper, B. (1983). The ontogeny of the interaction structure in BumbleBee colonies: a MIRROR model. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 12, 271-283.
- Hsu, S. C.; Weng, K. W.; Cui, Q.; Rand, W. (2016). Understanding the complexity of project team member selection through agent-based modeling. *International Journal of Project Management*, 34(1), 82-93.
- Jabri, A.; Zayed, T. (2017). Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations. *Automation in Construction*, 81, 210-223.
- Lansing, J. S.; Kremer, J. N. (1993). Emergent properties of Balinese water temple networks: coadaptation on a rugged fitness landscape. *American Anthropologist*, 95(1), 97-114.
- Liang, X.; Shen, G. Q.; Bu, S. (2016). Multiagent systems in construction: a ten-year review. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(6).
- Macal, C.; North, M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4, 151-162 .  
<https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Micolier, A.; Taillandier, F.; Taillandier, P.; Bos, F. (2019). Li-BIM, an agent-based approach to simulate occupant-building interaction from the Building-Information Modelling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82, 44-59.
- Osman, H. (2012). Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities. *Automation in Construction*, 28, 45-57.
- Porter, S.; Tan, T.; Tan, T.; West, G. (2014). Breaking into BIM: Performing static and dynamic security analysis with the aid of BIM. *Automation in Construction*, 40, 84-95.
- Ren, Z.; Anumba, C. J. (2004). Multi-agent systems in construction—state of the art and prospects. *Automation in Construction*, 13(3), 421-434.
- Ren, Z.; Anumba, C. J.; Ugwu, O. O. (2003). Multiagent system for construction claims negotiation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(3), 180-188.
- Shi, J.; Ren, A.; Chen, C. (2009). Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in Construction*, 18(3), 338-347.
- Taghaddos, H.; AbouRizk, S.; Mohamed, Y.; Hermann, U. (2012). Simulation-based auction protocol for resource scheduling problems. *Journal of construction engineering and management*, 138(1), 31-42.
- Walsh, K.; Sawhney, A.; Bashford, H. (2003). Agent-based Modeling and Simulation in Construction. In *Proceedings, Agent-Based Simulation* (Vol. 4, pp. 28-30).
- Watkins, M.; Mukherjee, A.; Onder, N.; Mattila, K. (2009). Using agent-based modeling to study construction labor productivity as an emergent property of individual and crew interactions. *Journal of construction engineering and management*, 135(7), 657-667.
- Xue, X.; Li, X.; Shen, Q.; Wang, Y. (2005). An agent-based framework for supply chain coordination in construction. *Automation in construction*, 14(3), 413-430.
- Yang, L.; Mohamed, Y. (2008). Multi-agent resource allocation (MARA) for modeling construction processes. In *2008 Winter Simulation Conference* (pp. 2361-2369). IEEE.
- Yazdani, S.; Yusof, M. J. M.; Azizi, M. M.; Ali, A. A. A. (2015). An Agent-Based Framework to Improve Coordination in the Process of Urban Infrastructure Provision in Iran. *International Journal of Environmental Planning and Management*, 1(1), 18-32.
- Zhang, P.; Li, N.; Jiang, Z.; Fang, D.; Anumba, C. J. (2019). An agent-based modeling approach for understanding the effect of worker-management interactions on construction workers' safety-related behaviors. *Automation in Construction*, 97, 29-43.
- Zhu, J.; Mostafavi, A. (2017). Performance assessment in complex engineering projects using a system-of-systems framework. *IEEE Systems Journal*, 12(1), 262-273.

