

Planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM 5D *

Jherson Jhadir Bohórquez-Castellanos

Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga – Colombia.
jhersonbohorquez@gmail.com  orcid.org/0000-0003-4594-098X

Hernán Porras-Díaz

Doctor en Ingeniería Telemática, Universidad Politécnica de Madrid. Magíster en Gestión Tecnológica, Universidad Pontificia Bolivariana. Rector de la Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga – Colombia.
hporras@uis.edu.co  orcid.org/0000-0001-9402-9995

Omar Giovanni Sánchez-Rivera

Doctorando en Ingeniería - Gestión de Desarrollo Tecnológico, Universidad Industrial de Santander. Profesor Cátedra, Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga – Colombia.
omar.sanchez@correo.uis.edu.co  orcid.org/0000-0001-6070-3910

María Camila Mariño-Espinel

Estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga - Colombia.
camila_espinel@outlook.com  orcid.org/0000-0001-6388-848X

RESUMEN

La planificación de recursos humanos de un proyecto de construcción es una actividad de gran importancia para el desarrollo exitoso de este tipo de actividades. Resulta una labor compleja que requiere de herramientas y metodologías automatizadas que permiten la optimización de variables relacionadas con tiempo y costos. Building Information Modeling (BIM) es una base de datos digital que proporciona una réplica virtual del proceso constructivo a partir de cinco variables: i) el tiempo; ii) el costo; y tres dimensiones: x, y, z; el modelo se conoce como BIM 5D. En este artículo se propone una metodología para la planificación de recursos humanos que tome como referencia la simulación del proceso constructivo BIM 5D. Se expone un conjunto de técnicas para la planificación del recurso humano en proyectos de construcción y se realiza la planificación de un caso de estudio a partir del enfoque BIM 5D. Con base en los resultados se formaliza un método para el diseño de la planificación del recurso humano. Comparado con otras metodologías, la propuesta presenta ventajas como la automatización del proceso y la posibilidad para la evaluación de distintas alternativas en tiempos reducidos.

PALABRAS CLAVE

BIM 5D, building information modeling, construcción, mano de obra, planificación de recursos humanos.

Recibido: 17/09/2017 Aceptado: 20/11/2017

* <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2018v14n1.27106> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Publicado por Universidad Libre - Cali, Colombia.

Cómo citar este artículo: BOHÓRQUEZ-CASTELLANOS, Jherson Jhadir; PORRAS-DÍAZ, Hernán; SÁNCHEZ-RIVERA, Omar Giovanni; MARIÑO-ESPINEL, María Camila. Planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM 5D. En: Entramado. Enero - Junio, 2018. vol. 14, no. 1, p. 252-267 <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2018v14n1.27106>



Planning of human resources from the simulation of the construction process in BIM 5D models

ABSTRACT

The human resources planning of a construction project is an activity of great importance for the successful development of construction activities. It is a complex task that requires automated tools and methodologies that allow the optimization of variables related to time and costs. Building Information Modeling (BIM) is a digital database that allows to obtain a virtual replication constructive process from five variables: i) time; ii) costs; and three dimensions x, y, z; model that is known as BIM 5D. In this paper, it proposes a methodology for the planning of human resources based on the simulation of the BIM 5D construction processes. A set of techniques for the planning of the human resource in construction projects is presented and planning of a case study is carried out from the BIM 5D approach. Taking in account the results, it formalized a method for human resource planning. Compared to other methodologies, it presents advantages such as automation and the possibility of evaluating different alternatives in reduced times.

KEYWORDS

BIM 5D, building information modeling, construction, human resources planning, manpower.

Planejamento de recursos humanos a partir da simulação do processo construtivo em modelos BIM 5D

RESUMO

O planejamento de recursos humanos de um projeto de construção é uma atividade de grande importância para o desenvolvimento bem-sucedido deste tipo de atividades. É uma tarefa complexa que requer ferramentas e metodologias automatizadas que permitem a otimização de variáveis relacionadas com tempo e custos. Building Information Modeling (BIM), em português, Modelagem da Informação da Construção, é um banco de dados digital que fornece uma réplica virtual do processo de construção com base em cinco variáveis: i) tempo; ii) o custo; e três dimensões: x, y, z; o modelo é conhecido como BIM 5D. Este artigo propõe uma metodologia para o planejamento de recursos humanos que toma como referência a simulação do processo de construção do BIM 5D. Expõe-se um conjunto de técnicas para o planejamento de recursos humanos em projetos de construção e realiza-se o planejamento de um estudo de caso com base na abordagem BIM 5D. baseado nos resultados, formaliza-se um método para o planejamento de recursos humanos. Em comparação com outras metodologias, a proposta apresenta vantagens como automatização do processo e a possibilidade de avaliação de diferentes alternativas em tempos reduzidos.

PALAVRAS-CHAVE

BIM 5D, Building Information Modeling, construção, mão de obra, planejamento de recursos humanos.

Introducción

Los proyectos de construcción se caracterizan por requerir una cantidad considerable de recursos, entre los que se encuentran los humanos, necesarios para el desarrollo de las actividades de construcción, los cuales se desatan por influir de forma significativa en las variables: tiempo y costo (Nie, Staub-French, Froese, 2007); razón por la cual, resulta indispensable un ejercicio riguroso de planificación, con anterioridad al inicio de las actividades de construcción. La planificación de los recursos humanos en un proyecto de construcción es una tarea compleja que es determinada por el gran número de elementos y variables relacionadas; además de las condiciones cambiantes, propias de la fase de construcción (Elhakeem y Hegazy, 2005). Entre los métodos propuestos de planificación de recursos humanos se desta-

can los que se fundamentan en técnicas de regresión múltiple, enfocados en predecir la demanda de mano de obra que se requiere en el desarrollo de la fase de construcción de un proyecto (Ho, 2010; Sing, Love y Tam, 2012; Sing *et al.*, 2016). Estas técnicas resultan herramientas útiles para las organizaciones gubernamentales en la gestión estratégica de los proyectos de infraestructura (Sing *et al.*, 2012; Sing, Love y Tam, 2014), dado que buscan predecir la cantidad de personal competente para el desarrollo de la fase de construcción (Ho, 2010).

La planificación de recursos humanos es afectada por la tipología del proyecto, por el hecho de que las actividades de construcción son de naturaleza única. Cada proyecto cuenta con características propias que lo diferencian de los demás, esto conlleva que puedan presentarse distintos procesos constructivos en donde varían los rendimientos

de las cuadrillas de trabajo y su grado de experticia. Por lo tanto, suele presentarse que la planificación del recurso humano se dé a partir de la experiencia en proyectos similares terminados (Elhakeem y Hegazy, 2005; Persad, O'Connor y Varghese, 1995).

El proceso de planificación de recursos humanos, en un proyecto de construcción, consiste en un conjunto de decisiones enfocadas a establecer el número de trabajadores requeridos, los tiempos de contratación y la asignación de actividades a desarrollar, en donde se busca la optimización de las variables tiempo y costo, sin sacrificar las condiciones de seguridad de los trabajadores y del proyecto mismo (Elhakeem y Hegazy, 2005; Braimah, 2014). Un buen ejercicio de planificación aumenta las posibilidades de éxito en el desarrollo de un proceso de construcción mediante la realización de las actividades requeridas en los tiempos establecidos y de acuerdo a las especificaciones técnicas. Por tanto, la planificación debe brindar herramientas que permitan realizar un control constante de las actividades (Shaffer, 1988). No obstante, en un número significativo de casos se pasan por alto las actividades de control. Ello provoca que los resultados obtenidos sean obsoletos en la etapa de planificación (Gomar, Haas y Morton, 2002; Shing-Tao, 2001).

“El principio fundamental que guía la toma de decisiones de la planificación del recurso humano es: ‘poner a la persona adecuada en el lugar apropiado y en el momento preciso’” (Wu y Issa, 2014, 1479). En este sentido, se observa la necesidad de una réplica del proyecto, en donde sea posible asignar los recursos humanos a cada uno de los elementos que lo conforman; además de la posibilidad de realizar simulaciones de diferentes procesos constructivos y alternativas del recurso humano en procura de la optimización. En este sentido, dichas necesidades pueden ser satisfechas mediante la aplicación de la tecnología BIM 5D.

Por consiguiente, BIM puede ser definido como una base de datos digital que permite almacenar e integrar la información de un proyecto de construcción a partir de una réplica virtual (Azhar, 2011), en la que es posible gestionar la información en pro del mejoramiento de las características del plan y la anticipación de situaciones indeseadas (Bynum, Issa y Olbina, 2013; Ashcraft, 2008) a lo largo de las diferentes fases del ciclo de vida de un proyecto (Lu *et al.*, 2012; Shujaa *et al.*, 2013; Quiroga, 2015). Adicionalmente, BIM se concibe como herramienta de visualización y simulación para la evaluación de diferentes alternativas en tiempos reducidos, (Nepal *et al.*, 2012) las cuales pueden ser configuradas mediante la variación de características como: geometrías, relaciones espaciales, información geográfica, propiedades de elementos de construcción, costos, materiales, tiempos, entre otros. De esta manera, se brinda la opción de simular el comportamiento a través del tiempo (Su y Cai, 2014).

A saber, con BIM es posible modelar y simular el proceso constructivo de un proyecto a partir de cinco variables: el tiempo, el costo y tres dimensiones x, y, z; lo que se conoce como modelos BIM 5D, obteniendo una réplica virtual del proceso constructivo de un proyecto a partir de un programa de obra. Lo cual, proporciona la posibilidad de evaluar distintas alternativas de planificación de recursos humanos sin poner en riesgo vidas humanas ni capitales económicos considerables (Chong *et al.*, 2016). Asimismo, resulta ser una herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones con ventajas notables a herramientas tradicionales como: diagramas de Gantt, diagramas de red y el método de la ruta crítica (CPM) (Su y Cai, 2014). Gracias a la aplicación de BIM es posible automatizar las actividades, lo cual disminuye la posibilidad de errores humanos y el esfuerzo para la obtención de resultados (Sánchez-Rivera, 2015; Porras-Díaz *et al.*, 2015).

Por consiguiente, se tienen presentes las necesidades de herramientas y metodologías automatizadas y confiables para el apoyo de la planificación de recursos humanos de proyectos de construcción y el potencial del enfoque BIM en el desarrollo del presente trabajo. Por lo tanto, el objetivo principal del proyecto es proponer una metodología para la planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo BIM 5D. Para ello, se expone una revisión bibliográfica de un conjunto de técnicas de planificación del recurso humano en proyectos de construcción y se realiza un ejercicio de planificación de un caso de estudio con el enfoque BIM 5D.

Marco teórico: Estrategias de planificación del recurso humano

La asignación del recurso humano a las actividades de obra en proyectos de construcción es una labor compleja, debido a que los proyectos deben cumplir con un tiempo, un costo y un alcance determinado; en la mayoría de proyectos, la asignación de trabajo a las cuadrillas se realiza con base en la experiencia que tienen los directores de obra. La cual les permite tener una visión general de la magnitud del proyecto para establecer las horas-hombre de cada actividad constructiva y así comprometerse con una fecha de entrega.

Igualmente, es crucial conocer los antecedentes con el fin de observar cómo se ha llevado a cabo la planificación a lo largo del tiempo y qué metodologías y estrategias se han aplicado en proyectos similares. Por esta razón, a continuación se presentan algunos trabajos que establecen lineamientos importantes a la planificación propuesta en esta investigación.

1.1. Planificación de la mano de obra - hacer un contrato moral

Schaffer (1998) manifiesta que incluir a los trabajadores en la toma de decisiones respecto al trabajo que realizan conlleva a que estos se involucren moralmente con el proyecto, lo cual permite que tanto empleadores como trabajadores alcancen los objetivos que se han propuesto en la planificación de la actividad constructiva. Lo anterior converge en un interés, por parte de los trabajadores, en exceder sus expectativas y en la percepción como un desafío del alcance de las metas que se establecieron en conjunto en la toma de decisiones. El método que propone el autor busca que todas las personas involucradas en el proyecto (ingenieros, contratistas, proveedores, mano de obra, etc.) estén informadas e interactúen para lograr un común acuerdo en el establecimiento de las horas-hombre. Por consiguiente, la aplicación del método requiere de la realización de dos reuniones: en la primera, se debe mostrar todo el trabajo que se debe realizar y, además, el alcance del proyecto para acordar las tareas individuales; en la segunda, se integra la estimación de horas de trabajo de los participantes y se soluciona cualquier conflicto o requerimiento de la mano de obra, con el fin de obtener una proyección de las horas hombre y un calendario de obra con la fecha de culminación del proyecto. Así se tiene comprometida moralmente a la mano de obra con un determinado número de horas de trabajo y con un calendario para completar las actividades asignadas.

1.2. Planeación estratégica del recurso humano para la gestión en la construcción

Maloney (1997) afirma que, dentro de las organizaciones, las estrategias de gestión que involucran recursos humanos reciben una consideración menos formalizada y, en particular, las empresas del sector de la construcción que omiten, intencionalmente, las estrategias asociándolas al seguimiento que realiza el líder o a la gestión del recurso humano como organización de otros sectores. Es necesario crear oportunidades y ambientes laborales en los cuales los trabajadores puedan ser productivos, teniendo en cuenta que la productividad hace referencia a que el rendimiento de una unidad de trabajo debe funcionar al de sus capacidades, independientemente de la forma en que se emplee. Razón por la cual, se deben desarrollar estrategias para la gestión del recurso humano de forma conjunta a otras estrategias de la organización, con la finalidad de resolver problemas como la disponibilidad de mano de obra calificada.

En suma, además de gestionar y asignar el recurso humano a las actividades de obra, se requiere que los trabajadores se involucren con los proyectos y participen de forma

continua y activa para lograr conjuntamente los objetivos de la organización. Esto se logra con el mejoramiento del desempeño de los trabajadores. En la Figura 1 se evidencia la manera cómo el autor clasifica la mejora del desempeño mediante cinco enfoques que miden el grado de participación de los empleados; en el lado izquierdo los trabajadores solo siguen órdenes relacionadas con el qué hacer y cómo se debe hacer; mientras que a medida que se llega el extremo derecho del gráfico los trabajadores se involucran en decisiones importantes que exigen un juicio basado en su experiencia y conocimientos.

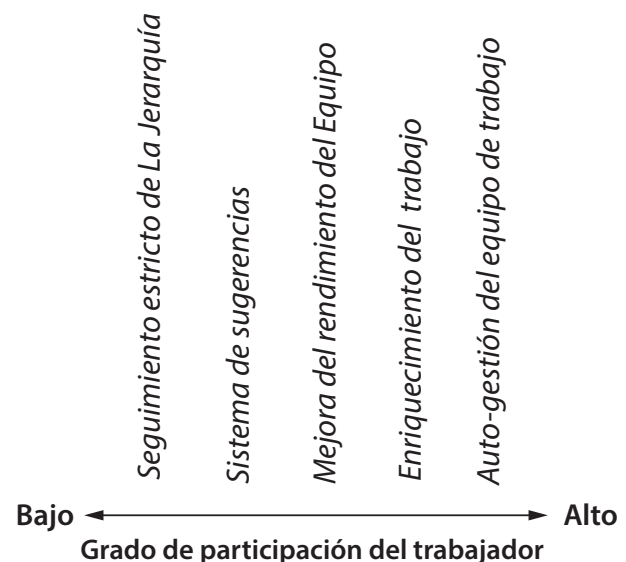


Figura 1. Participación de los trabajadores.

Fuente: Elaboración propia con base en Maloney, 1997

1.3. Asignación y optimización de la distribución de mano de obra parcialmente polivalente/multiskilled

Gomar, Haas y Morton (2002) investigaron la asignación y distribución de mano de obra polivalente en un proyecto de construcción en el cual se desarrolla un modelo de programación lineal para optimizar el proceso. La polivalencia de mano de obra se refiere a múltiples tareas esenciales que puede ejecutar un individuo durante la construcción y que le permite participar en más de un proceso constructivo. La asignación de estos individuos es una estrategia que permite reducir el costo y mejorar el rendimiento de la mano de obra, aunque el éxito depende de la capacidad del jefe de asignar al trabajador apropiado para la labor indicada y de su efectividad al conformar las cuadrillas de trabajo según la experiencia y habilidades de los trabajadores. Los autores, después de ejecutar el modelo, demuestran que los empleados pueden realizar más de una tarea esencial y que, de

acuerdo a sus habilidades, estos incrementan su tiempo de participación en el proyecto, como se observa en la Figura 2. Sin embargo, después de 2 o 3 habilidades es muy corto el incremento del beneficio en la duración de la participación de la mano de obra.

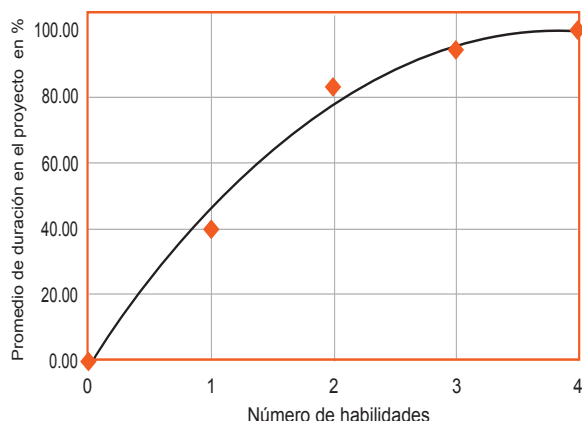


Figura 2. Promedio de duración de los trabajadores en el proyecto respecto al número de habilidades poseídas.

Fuente. Elaboración propia con base en Gomar *et al.*, 2002

1.4. Aproximación grafica para la planificación de la mano de obra en redes de infraestructura

Elhakeem y Hegazy (2005) desarrollaron una forma de planificar el recurso humano para la construcción de redes de infraestructura con base en el modelo de planificación distribuido (Distributed Scheduling Model - DSM) (Hegazy, Elhakeem y Elbeltagi, 2004), el cual permite planificar recursos, optimizar costos y realizar la programación de obra para mega proyectos de construcción. Dentro de la planificación del recurso humano, el modelo muestra a las cuadrillas codificadas con un color para diferenciarlas en los distintos sitios de obra. En este sentido, la mano de obra necesaria para cumplir con la fecha de terminación del proyecto es calculada a partir de la duración y el costo de las distintas actividades constructivas.

Respecto a las condiciones favorables de trabajo, estas permiten que las cuadrillas laboren al cien por ciento de rendimiento. Ahora bien, con el fin de simplificar el proceso de cálculo de cuadrillas, los autores desarrollaron un nomograma que representa gráficamente la formulación matemática. Sin embargo, debido a la variabilidad en las condiciones de trabajo, la productividad puede disminuir, es decir, se hace necesario un mayor número de cuadrillas para finalizar las actividades en el tiempo estipulado. De esta manera, se plantea un segundo nomograma que ajusta el número inicial de cuadrillas que prevé un riesgo de retraso en la ruta crítica de las actividades.

1.5. Modelo de planificación basado en construcción ajustada para obras de corta duración

Virgilio Cruz-Machado y Pedro Rosa (2007) desarrollaron un modelo de planificación basado en la construcción sin pérdidas (Lean Construction), modelo que puede aplicarse a obras de corta duración con énfasis en los recursos de planificación. Para los autores el medio humano es esencial, limitado y renovable, es el componente más complejo de planificar en cualquier actividad, debido a los múltiples factores que lo afectan como el rendimiento, la ergonomía, la productividad, entre otros. La gestión del recurso humano es un proceso en el cual se debe tener claro qué perfiles profesionales se necesitan para lograr de manera exitosa la ejecución de obra, en la cual se asigna uniformemente el recurso a las actividades y se reducen las sobrecargas de trabajo. Dentro del modelo desarrollado, se propone una fase de planificación, como se evidencia en la Figura 3, en la que se identifica la mayoría de problemas que pueden presentarse durante la ejecución del proyecto y que, por lo general, generan retrasos y sobrecostos.

2. Metodología

Para planificar los recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM se propone el siguiente proceso, el cual fue aplicado en un caso de estudio que consiste en la simulación de la construcción de una estructura en concreto reforzado. En este sentido, se tiene como base algunos de los pasos desarrollados en: «Metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías "Building Information Modeling"» (Porras-Díaz *et al.*, 2015). En el proceso se realiza una optimización que permite integrar de forma genérica la planificación del recurso humano en el proceso n-dimensional del modelado BIM.

Por ende, el proceso a gran escala consiste en construir los elementos estructurales por fases de forma secuencial, mediante el uso del recurso humano por cuatro cuadrillas de trabajo, conformadas por un oficial y un ayudante. Las cuadrillas están representadas visualmente por un color característico durante la simulación del modelo BIM 5D. Adicionalmente, se genera un algoritmo UML, de planificación de los recursos humanos, que puede ser empleado a cualquier proyecto de construcción.

2.1. Identificación de variables para la planificación de recursos humanos

Las variables necesarias para realizar la planificación de recursos humanos, a partir de la simulación de modelos



Figura 3. Modelo de planificación.

Fuente. Elaboración propia con base en Virgilio Cruz-Machado y Pedro Rosa, 2007

BIM, se identificaron según lo planteado por Bohórquez (2016) mediante una búsqueda bibliográfica relacionada con las siguientes palabras clave: manpower, human resources allocation, manpower in construction, workforce, BIM and manpower, planning manpower with.

2.2. Elección del caso de estudio.

El caso de estudio es una estructura en concreto reforzado de una edificación de tres plantas, en la cual se realiza la planificación detallada del recurso humano con la implementación de la simulación BIM 5D. La empresa JM CONSTRUCCIÓN & CONSULTORIA S.A.S suministra los documentos de diseño para fines académicos. Estos documentos corresponden al proyecto CASA LA CASTELLANA, la cual está compuesta por una estructura en concreto reforzado de 4 plantas, ubicada en el departamento de Santander.

2.3. Modelado BIM 3D del caso de estudio

El proceso de almacenamiento de información, sobre el proceso constructivo, en modelos BIM es conocido como modelado BIM 3D. Para el caso de estudio, la información de entrada son los dibujos CAD 2D y el software utilizado para el modelamiento es Autodesk Revit. Así, con el modelo BIM 3D se obtiene la información física del proyecto, centralizada en una única base de datos. Además, incluye la información de construcción de los elementos del proyecto: zapatas, vigas de cimentación, columnas, vigas aéreas, placa aligerada; estructuras temporales: formaletas, parales, tableros y cerchas.

2.4. Planificación del recurso humano

En el software Microsoft Project 2016 se realiza el programa de obra con un calendario de trabajo que incluye los tiempos de inicio y culminación de la obra en el año 2017. Se integra, además, la información de rendimientos y cantidades de obra con el fin de asignar el recurso humano que ejecuta cada actividad. En relación con el proceso de planificación se describe, detalladamente, de la siguiente manera:

La información para asignar los rendimientos de obra se obtiene, a partir de la investigación “Análisis de rendimientos de mano de obra para actividades de construcción-Estudio de caso Edificio J UPB-” (Sánchez, 2009) en donde se toman medidas del tiempo que emplea cada cuadrilla para realizar las actividades básicas de la construcción de estructuras en concreto reforzado (refuerzo, encofrado, fundida y desencofrado). En lo que respecta a la selección de la fuente de rendimientos, esta se encuentra basada en consideración con las características de las construcciones J UPB y CASA LA CASTELLANA, que se encuentran ubicados en la región del área metropolitana de Bucaramanga, Colombia.

Las cantidades de obra fueron estimadas de forma automatizada mediante el modelo BIM 3D, el cual realiza una codificación, que permite dividir por fases constructivas el proyecto, con el propósito de asignar un número de actividades a cada una de las cuadrillas de la obra en gestión. Ejemplos de la codificación realizada son: RZF2: refuerzo zapatas fase 2, CZF2: concreto zapatas fase 2, EZF2: encofrado zapatas fase 2.

En el programa de obra se calcula la duración de las actividades constructivas, se elabora el producto entre el rendimiento y la cantidad de obra de las actividades básicas de construcción. Las labores relacionadas con el uso de concreto reforzado se dividen en cuatro actividades: refuerzo, encofrado, fundida y desencofrado. Dada a la utilización de Microsoft Project se definen las fechas de comienzo y fin de cada una de las actividades, dentro del calendario de obra, y se asignan las precedencias según un orden lógico y realizable. Por último, se identifica cada cuadrilla de un oficial y un ayudante a partir de un código representativo: C1, C2, C3, C4.

Por consiguiente, es necesario asignar a las cuadrillas sus respectivas actividades, de modo que cada integrante esté comprometido al cien por ciento con el número de horas de trabajo estipuladas que es de cuarenta y ocho por semana.

2.5. Modelado BIM 5D

El modelo BIM 4D se obtiene mediante la integración del modelo BIM 3D y el programa de obra, lo que se traduce en agregar la dimensión del tiempo. Para la planificación del recurso humano se agrega la variable de asignación de la mano de obra al modelo BIM 4D y se obtiene un modelo BIM 5D. Para la elaboración del modelo BIM 5D se utiliza el software Autodesk Navisworks 2016, en el cual se tienen en cuenta las actividades suministradas a cada una de las cuadrillas definidas, mediante la asignación de un color y la información proveniente del programa de obra elaborado en Microsoft Project.

El costo de la mano de obra es una variable que puede ser adicionada al modelo BIM 5D, que da pie para la obtención de un modelo BIM 6D. Para el objeto de análisis se asume el costo de \$19.135 por hora laboral para una cuadrilla, compuesta por un oficial y un ayudante. La unidad de medida de los costos es pesos colombianos.

2.6. Algoritmo UML para la planificación del recurso humano

Finalmente, con las estrategias de planificación enunciadas y el modelado y simulación BIM 5D del caso de estudio, se formula un algoritmo en lenguaje UML (Unified Modeling Language) con los pasos necesarios para la planificación de los recursos humanos de un proyecto de construcción. Se reitera y destaca la innovación de integrar BIM como herramienta tecnológica para el mejoramiento de procesos y de toma de decisiones.

3. Resultados

3.1. Variables para la planificación de recursos humanos.

Las variables necesarias para realizar la planificación de recursos humanos mediante la simulación de modelos BIM (Bohórquez, 2016) se resumen en la Tabla I y se describen a continuación:

Tabla I.
Variables identificadas

Id	Variable
1	Actividad constructiva
2	Cantidad de obra
3	Rendimiento
4	Duración
5	Secuencia del proceso constructivo
6	Recurso Humano
7	Jornada laboral
8	Calendario del proyecto

Fuente. Elaboración propia.

3.1.1. Actividad Constructiva.

Representa qué labor va a ejecutar cada cuadrilla de trabajo, dado que el caso de estudio es una estructura en concreto reforzado, las actividades principales analizadas son las de encofrado (E), colocación del refuerzo (R), fundida (F) y desencofrado (D).

3.1.2. Cantidad de obra.

La cantidad de obra es indispensable, puesto que del tamaño de la obra depende la cantidad de trabajadores a contratar. Esta variable fue medida con el software Autodesk Revit, en el que se destaca la automatización del cálculo de cantidades; para lo cual, se crean agrupaciones asociadas al elemento estructural en concreto reforzado: vigas (V), columnas (C), zapatas (Z).

3.1.3. Rendimiento.

Hace referencia a un factor que representa el tiempo que se necesita para realizar una unidad de cantidad de obra, representativa en cada actividad constructiva (Mejía y Hernández, 2007); por ejemplo, cuánto tiempo se requiere para la fundida de un metro cúbico de concreto en una viga, en una columna, en una zapata o en una vigueta. En esta investigación los rendimientos consultados están dados en horas por metro cúbico para: la fundida, el encofrado y el desencofrado del concreto; en horas por kilogramo para: el armado del acero de refuerzo.

3.1.4. Duración.

Al tener el rendimiento y las cantidades de obra es posible calcular la duración de cada actividad constructiva. Al definir el producto, resultante de las dos variables, se obtiene un valor de tiempo de construcción en horas. Esta duración permite asignar fechas precisas de inicio y terminación de las actividades de obra gracias al cálculo realizado en el programa Microsoft Project.

3.1.5. Secuencia del proceso constructivo.

La secuencia del proceso constructivo es importante para saber en qué orden se deben realizar las tareas del proyecto. Por ejemplo, antes de fundir una placa debe estar dispuesta la estructura temporal de soporte, y antes de vaciar el concreto es necesario que esté terminado el armado del refuerzo de vigas y viguetas del piso correspondiente. Dicha sucesión de actividades es representada mediante el uso de la columna, predecesoras del diagrama de Gantt de Microsoft Project y de la organización de las tareas por fases de actividad constructiva, para cada elemento estructural y temporal de cada piso de la estructura.

3.1.6. Recurso Humano.

El recurso humano es el que ejecuta las actividades de construcción para hacer realidad cada elemento. Además de planificar qué va a realizar cada trabajador durante la obra. Por ello, es importante conseguir mano de obra calificada que pueda rendir al cien por ciento de su capacidad; se hace uso del gráfico de recursos de Microsoft Project, debido que los diagramas de barras muestran la asignación porcentual del recurso humano. Esto se hizo con el fin de evitar que este medio se sobre-asigne o sub-asigne.

3.1.7. Jornada laboral.

Es importante planificar la Jornada laboral, puesto que esta establece los turnos de trabajo. Para el caso de estudio se crea un horario semanal de 48 horas de trabajo para cada cuadrilla. Además, se establecen turnos de la siguiente manera: de lunes a viernes en la mañana de 7:00 am a 12:00 m, en la tarde de 1:00 pm a 5:00 pm y el sábado de 8:00 am a 11:00 am.

3.1.8. Calendario del proyecto.

El calendario del proyecto se tiene en cuenta para establecer los días laborables y así evitar la asignación de trabajo los días festivos. No obstante, el calendario se puede ver afectado al imponerse una determinada fecha de entrega del proyecto por el dueño, variable que perjudica la necesidad de aumentar o disminuir las cuadrillas de trabajo.

3.2. Dibujos 2D del caso de estudio

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la información 2D con la que se elabora el modelo BIM 3D, la cual corresponde al refuerzo de una viga del segundo piso.

3.3. Modelo BIM 3D del caso de estudio

En la Figura 5 se constata el modelo BIM 3D mediante una representación virtual de los elementos de construcción del caso de estudio (zapatas, vigas de cimentación, columnas, vigas aéreas, placa aligerada), el modelo contiene información del diseño. Por otro lado, la Figura 6 muestra el modelo BIM 3D con detalle en las estructuras temporales (formaletas, parales, tableros y cerchas).

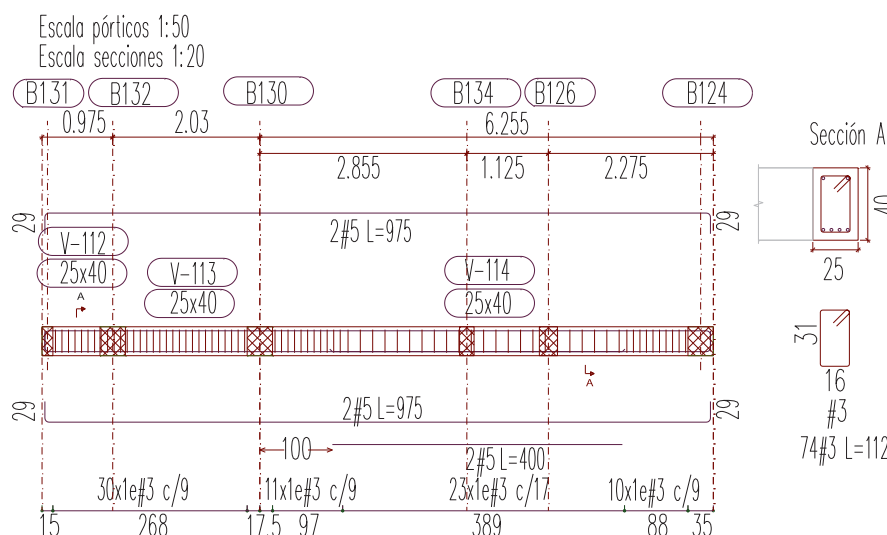


Figura 4. Sección de un plano de Despiece.
Fuente: Elaboración propia

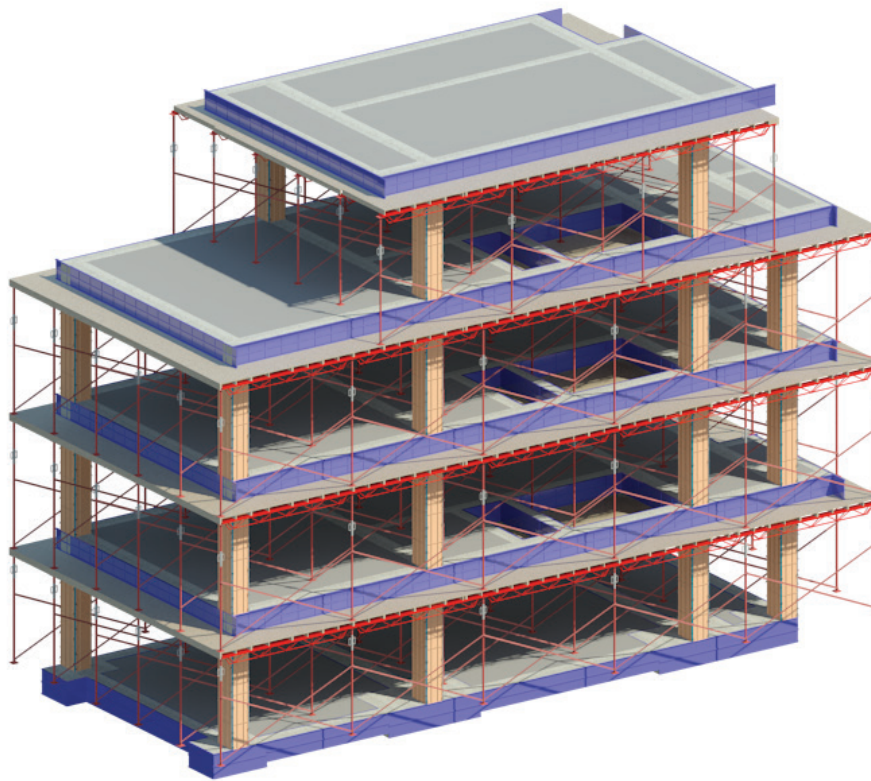


Figura 5. Modelo BIM 3D.

Fuente. Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2016

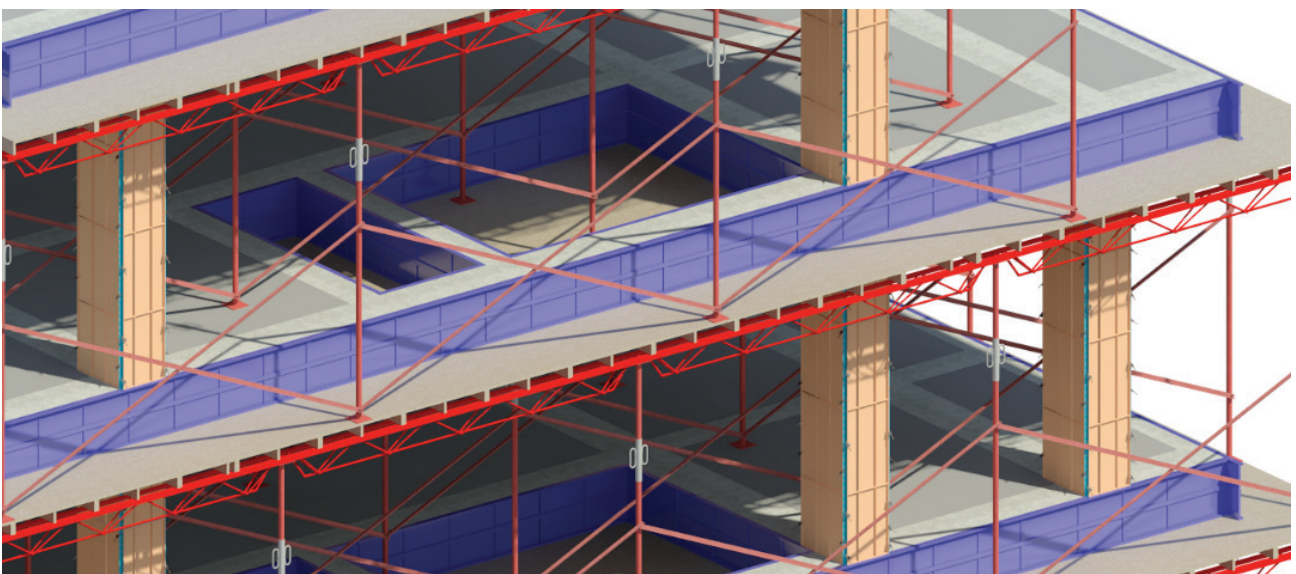


Figura 6. Sección del Modelo BIM 3D.

Fuente. Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2016

3.4. Planificación del recurso humano del caso de estudio

A continuación, se muestran los resultados de los pasos definidos para realizar la planificación de recursos humanos:

3.4.1. Rendimientos de obra.

En la Tabla 2 se observa la nomenclatura que representa cada actividad constructiva además, en las Tablas 3 y 4 se evidencian los rendimientos correspondientes a las actividades en función con la cantidad de obra que representan.

Tabla 2.

Nomenclatura de las actividades constructivas

Nomenclatura	
E	Encofrado
F	Fundida
D	Desencofrado
R	Refuerzo

Fuente. Elaboración propia

Tabla 3.

Rendimientos medidos en función de la cantidad de concreto

Rendimientos (Hr/m³)				
ELEMENTO	E	F	D	
Zapatas	2.70	1.91	0.71	
Columnas	2.54	1.91	1.03	
Vigas	2.45	1.93	1.41	

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4.

Rendimiento medido en función de la cantidad de acero

Nomenclatura	Rendimiento (Hr/Kg)
R	0.03

Fuente. Elaboración propia

3.4.2. Cantidades de obra.

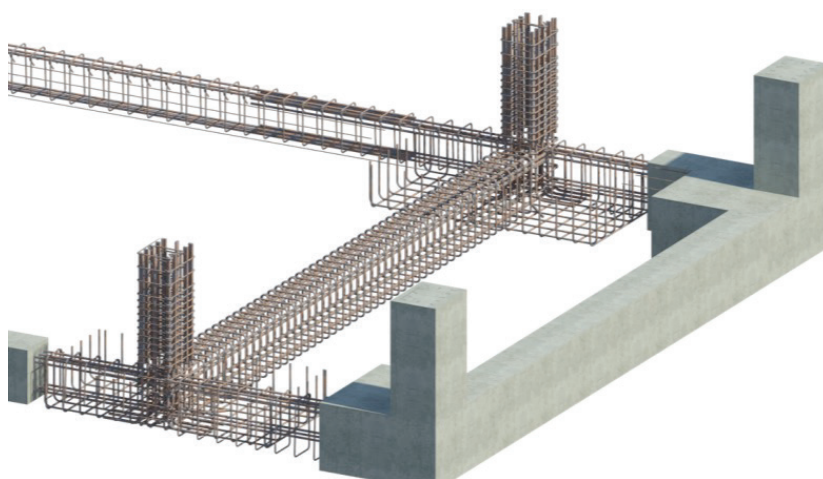
En la Figura 7 se observa el cálculo de cantidades de obra, el cual es obtenido del modelo BIM 3D. Paralelamente, en la Tabla 5 se presentan las cantidades totales del caso de estudio.

Tabla 5.

Resumen de cantidades de obra

Cantidades por elemento	Refuerzo	Concreto
Vigas aéreas	3866	26.0
Columnas	3804	9.8
Viguetas	1329	8.8
Vigas de Cimentación	1140	4.6
Losa Superior de entrepiso	428	9.4
Zapatas	234	3.0
Losa de Cimentación	134	5.2
Losa Inferior de entrepiso	72	3.8
Total	11007 kg	70

Fuente. Elaboración propia



<Structural Foundation Schedule>		
A	B	C
Comments	Type	Volume
CZF1	1000x1900x500	0.950000 m³
CZF1	900x900x500	0.405000 m³
CZF1: 2		1.355000 m³
CZF2	800x1200x500	0.480000 m³
CZF2	1100x2100x500	1.155000 m³
CZF2: 2		1.635000 m³
CZF3	800x1200x500	0.480000 m³
CZF3	1100x2100x500	1.155000 m³
CZF3: 2		1.635000 m³
CZF4	1000x1900x500	0.950000 m³
CZF4	900x900x500	0.405000 m³
CZF4: 2		1.355000 m³
Grand total: 8		5.980000 m³

Figura 7. Cantidades de obra del caso de estudio.

Fuente. Elaboración propia en el software Autodesk Revit 2016

3.4.3. Programa de obra.

El programa de obra se realiza según la jornada laboral de 48 horas totales, presentadas en la Figura 8. En este sentido, la Figura 9 señala la manera cómo está conformado el programa de obra: las actividades constructivas organizadas en fases y capítulos, los rendimientos, las cantidades de obra y el tiempo de duración de las actividades. Adicionalmente, las relaciones de procedencia. Se presenta el código de la cuadrilla asignada a cada actividad (C1, C2, C3, C4). Así, la Figura 10 refleja la asignación de actividades para la cuadrilla C4, en donde se destaca la dedicación del cien por ciento.

HORARIO DE TRABAJO SEMANAL		
LUNES-VIERNES	7:00 AM - 12:00 M	1:00 PM - 5:00 PM
SÁBADO	8:00 AM - 11:00 AM	

Figura 8. Horario laboral.
Fuente. Elaboración propia

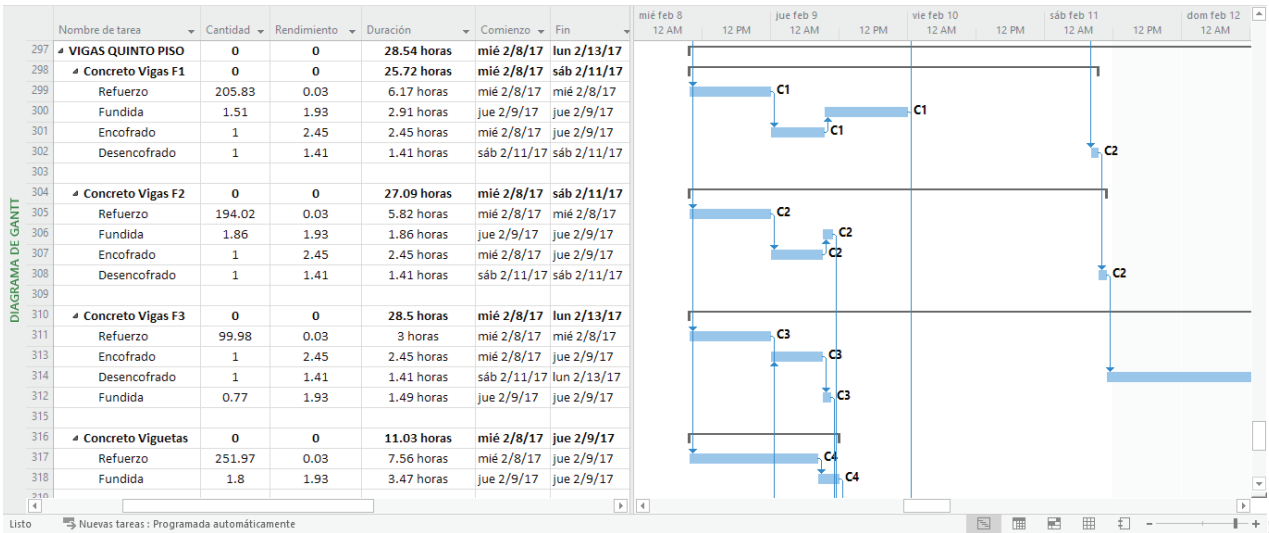


Figura 9. Programa de obra para la planificación del recurso humano.
Fuente. Elaboración propia en el software Microsoft Project 2016

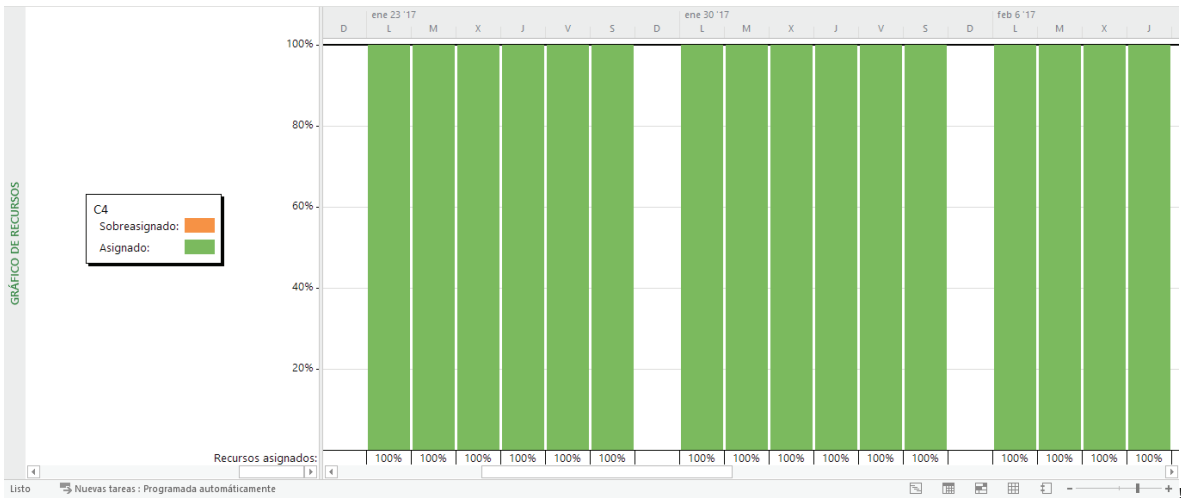


Figura 10. Gráfico de asignación de la cuadrilla C4.
Fuente. Elaboración propia en el software Microsoft Project 2016

3.5. Modelo BIM 5D y simulación del proceso constructivo

La Figura 11 presenta 6 momentos de la simulación BIM 5D, en los cuales se incluye: fecha, horas laboradas y costo acumulado de las cuadrillas planificadas.

Los colores representan cada una de las cuadrillas de la Tabla 4.

Tabla 6.

Colores por cuadrilla

Cuadrilla	Color
C1	
C2	
C3	
C4	

Fuente. Elaboración propia

<table><tr><td>Fecha</td><td>19/01/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>140</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$2,678,900</td></tr></table>		Fecha	19/01/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	140	Costo cuadrilla acumulado	\$2,678,900	1	<table><tr><td>Fecha</td><td>25/01/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>296</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$5,663,960</td></tr></table>		Fecha	25/01/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	296	Costo cuadrilla acumulado	\$5,663,960	2
Fecha	19/01/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	140																
Costo cuadrilla acumulado	\$2,678,900																
Fecha	25/01/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	296																
Costo cuadrilla acumulado	\$5,663,960																
<table><tr><td>Fecha</td><td>06/02/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>640</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$12,246,400</td></tr></table>		Fecha	06/02/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	640	Costo cuadrilla acumulado	\$12,246,400	3	<table><tr><td>Fecha</td><td>09/02/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>712</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$13,624,120</td></tr></table>		Fecha	09/02/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	712	Costo cuadrilla acumulado	\$13,624,120	4
Fecha	06/02/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	640																
Costo cuadrilla acumulado	\$12,246,400																
Fecha	09/02/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	712																
Costo cuadrilla acumulado	\$13,624,120																
<table><tr><td>Fecha</td><td>04/03/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>740</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$14,159,900</td></tr></table>		Fecha	04/03/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	740	Costo cuadrilla acumulado	\$14,159,900	5	<table><tr><td>Fecha</td><td>10/03/2017</td></tr><tr><td>Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)</td><td>786</td></tr><tr><td>Costo cuadrilla acumulado</td><td>\$15,040,110</td></tr></table>		Fecha	10/03/2017	Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	786	Costo cuadrilla acumulado	\$15,040,110	6
Fecha	04/03/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	740																
Costo cuadrilla acumulado	\$14,159,900																
Fecha	10/03/2017																
Horas de trabajo acumulado (1 oficial + 1 ayudante)	786																
Costo cuadrilla acumulado	\$15,040,110																

Figura 11. Simulación BIM 5D para la planificación del recurso humano del caso de estudio
Fuente. Elaboración propia en el software Navisworks Manage 2016

3.6. Algoritmo para planificación del recurso humano en proyectos de construcción

Con el fin de planificar el recurso humano que se requiere en proyectos de construcción, se propone el algoritmo UML evidenciado en la Figura 12 y descrito a continuación:

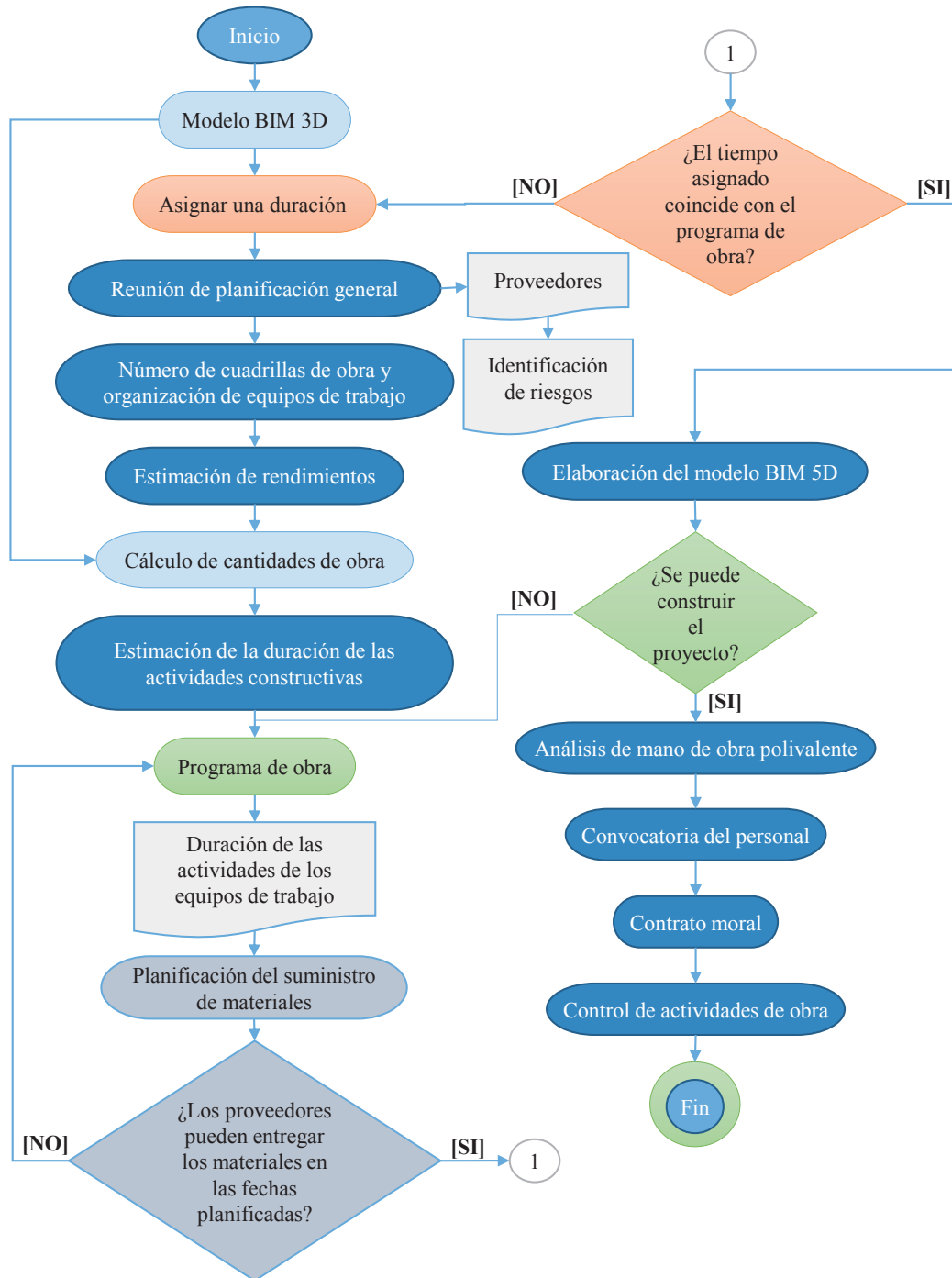


Figura 12. Algoritmo de planificación del recurso humano.
Fuente. Elaboración propia con base en Bohorquez (2016)

Dada la información del diseño del proyecto de construcción, se inicia el modelado que pretende obtener el modelo BIM 3D; el cual permite tener una visión general de la magnitud de obra, cuyo propósito es que el equipo planificador pueda asignar una duración preliminar a partir de la experiencia y requerimientos de tiempo exigidos por el dirigente. Con la duración establecida, se procede a realizar una reunión de planificación general en la cual participen los actores involucrados en el desarrollo de la fase de construcción del proyecto. Lo anterior se desarrolla con el fin de definir la totalidad de actividades necesarias y el método constructivo a emplearse. Además, es necesario tener en cuenta a los proveedores para obtener información sobre la disponibilidad del material y, de esta manera, poder realizar la identificación de riesgos que, posiblemente, se presenten durante la construcción del proyecto.

Con la información obtenida, duración aproximada de obra, actividades necesarias y método constructivo, se determina el número de cuadrillas que se deben emplear en el desarrollo del proyecto y se organizan los equipos de trabajo, mediante el establecimiento del ritmo laboral y de la estimación de rendimientos de las actividades constructivas necesarias en cada fase de la planeación del diseño. Desde el modelo BIM 3D se extraen las cantidades de obra, consolidadas de acuerdo a las actividades definidas; se procede, además, a la estimación de la duración de las actividades constructivas.

A saber, la información del procedimiento descrito permite proceder a la elaboración del programa de obra en donde se organizan las fases de construcción con sus respectivas actividades. En este sentido, es necesario proseguir a la asignación del recurso humano que debe efectuar las actividades. Adicionalmente, se definen las fechas de inicio y de fin. Por consiguiente, se procede a la integración del programa de obra con el modelo BIM 3D para así obtener el modelo BIM 4D. Las fechas obtenidas son indispensables para la planificación del suministro de materiales requeridos con el fin de evitar contratiempos y aumentar la posibilidad de que los proveedores entreguen los materiales en las fechas indicadas. De esta manera, se elude cualquier posibilidad de retraso en la ejecución de las labores. Además, si llegado el caso y los proveedores solicitan cambios mínimos en la entrega del material, solo se debe realizar un ajuste al programa de obra, sin perturbar de forma significativa el diseño establecido inicialmente.

Finalmente, se comprueba que el tiempo asignado para la construcción coincida con el tiempo calculado en el programa de obra, de no ser así se emprenden las estrategias para el ajuste del programa en una segunda iteración. De esta manera, una vez cumplido el requerimiento temporal se procede a la actualización de la simulación BIM 5D en la

que es posible detectar y corregir falencias del programa de obra resultante. Si se observa, en la simulación BIM 5D, que el programa de obra no se ajusta al método constructivo elegido de forma lógica, es pertinente revisar el diseño y realizar ajustes en las relaciones de precedencia seleccionadas para cada actividad y fase constructiva. Cuando se cumplen todas las condiciones del algoritmo y se tiene seguridad sobre la viabilidad de la planificación y de la simulación constructiva, es conveniente proceder al análisis de los perfiles profesionales, requeridos para la ejecución de la obra.

Por consiguiente, la mano de obra solicitada debe estar en capacidad de realizar la mayor cantidad posible de actividades establecidas. Dado que el objetivo es asegurar la participación de los trabajadores en las tareas asignadas, se hace necesario realizar un análisis polivalente del recurso humano, disponible en la zona en donde se implementa la construcción. Gracias a la información obtenida del análisis se procede a instaurar una convocatoria del personal, que debe ser capacitado, antes de la ejecución del proyecto. La fase de instrucción se desarrolla mediante la aplicación del concepto de contrato moral, en el que se presenta a los trabajadores en formación el proceso de planificación resumido en el modelo BIM 5D. Además, se debe informar al personal sobre la asignación del color, representativo de las cuadrillas, que facilita la identificación de actividades a realizar durante el avance del proyecto, determinado temporalmente con fechas de comienzo y fin para cada actividad. La implementación del contrato moral, responde a la necesidad de motivar a los trabajadores en potencia, para comprometerlos con la ejecución del proyecto a partir del mejoramiento continuo de su rendimiento. Por último, se realiza un control de actividades de obra en el que se compare la planeación y ejecución de labores con la ayuda de la simulación del modelo BIM 5D.

4. Conclusiones

La metodología propuesta es un proceso de varias variables que interactúan en un modelo BIM 5D que incluye principalmente la información tridimensional (BIM 3D) del proyecto, el tiempo para ejecutar cada actividad en orden secuencial de acuerdo al proceso constructivo (BIM 4D) y la visualización del recurso humano representado en colores, característicos durante la simulación del proceso constructivo. Además, de la inclusión del costo del trabajo que se debe realizar (BIM 5D). Adicionalmente, el modelo resulta útil para el monitoreo, control y seguimiento de las actividades ejecutadas por los trabajadores, mediante la comparación de lo evidenciado en el video de la simulación con el trabajo realizado en la obra.

Este trabajo ha dado cuenta de la importancia de la implementación del método constructivo presentado, dado que su carácter iterativo y automatizado permite el diseño y evaluación de diversas alternativas en relación con la planificación del recurso humano en tiempos reducidos. Lo anterior, con la finalidad de enriquecer el proceso de toma de decisiones, para que el equipo planificador disponga de un número significativo de opciones, en donde sea posible elegir la más conveniente y beneficiosa para el desarrollo del proyecto.

Además, la integración de la simulación BIM 5D con el concepto de contrato moral propicia la productividad en el desarrollo de un proceso de construcción, en vista de que se espera que los trabajadores se comprometan con el proyecto con el fin de mejorar la productividad. Por ello, cada unidad de trabajo debe funcionar al cien por ciento de su capacidad. Por consiguiente, se busca que la mano de obra ejecute hábilmente una serie de actividades básicas (polivalentemente), para lograr la participación en más de un proceso constructivo y el aseguramiento de su permanencia en la ejecución y culminación del proyecto. En este sentido, la simulación BIM 5D funciona como un medio de comunicación que establece una mediación práctica y ventajosa hacia el cumplimiento de los objetivos propuestos, dadas las notables ventajas de visualización que proporciona la inclusión de metodología BIM.

Durante el desarrollo de la planificación del recurso humano del caso de estudio se observa que la identificación proporcionada a cada cuadrilla de trabajo permite visualizar la participación en las actividades de construcción. Ello puede ser utilizado como herramienta tecnológica para la detección de sobre-cargas o sub-cargas laborales que posibiliten el aumento de la eficiencia del proceso constructivo desde la etapa de planificación del proyecto.

En suma, la simulación del modelo BIM 5D puede ser utilizada para realizar el monitoreo, control y seguimiento de las actividades programadas y ejecutadas durante el desarrollo del proceso de construcción. Así se configura como herramienta que posibilita la detección de atrasos e imprevistos de forma temprana mediante acciones de mitigación de riesgo. De esta manera, se propicia la disminución de inconvenientes temporales en relación con el cronograma propuesto y los sobrecostos que puede generar el atraso del mismo. No obstante, en las organizaciones que utilizan las herramientas de diseño con el enfoque BIM, la actividad de elaboración del modelo BIM 3D desaparece como actividad independiente y se convierte en información de entrada para la metodología planteada. Por lo que, se recomienda a las organizaciones que la implementación de BIM se realice en las distintas fases y actividades del ciclo de vida de los proyectos de construcción, esto teniendo presente

el potencial del enfoque BIM para dar solución a un número significativo de problemáticas existentes. ■■■

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento al grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo recibido para el desarrollo de la investigación.

El autor Omar Sánchez agradece a Colciencias por el apoyo recibido mediante la Convocatoria 727 Doctorados Nacionales 2015.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ASHCRAFT, Howard W. Building Information Modeling: A Framework for Collaboration. In: Construction Lawyer. 2008. Vol. 28, no. 3, p. 1–14. https://www.hansonbridgett.com/-/media/Files/Publications/bim_building_information_modeling_a_framework_for_collaboration.pdf
2. AZHAR, Salman. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. In: Leadership and Management in Engineering. 2011. Vol. 11, no. Bazjanac 2006, p. 241–252. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LM.1943-5630.0000127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127)
3. BOHÓRQUEZ CASTELLANOS, Jherson Jhadir. Planificación de recursos humanos para la construcción de estructuras en concreto reforzado, con base en modelos BIM 5D. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2016. 50 p.
4. BRAIMAH, Nuhu. Understanding Construction Delay Analysis and the Role of Preconstruction Programming. In: Journal of Management in Engineering. 2014. Vol. 30, no. 5, p. 4014023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000216](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000216)
5. BYNUM, Patrick. ISSA, Raja. R. A. y Olbina, Svetlana. Building information modeling in support of sustainable design and construction. In: American Society of Civil Engineers. 2013. Vol. 139, no. 1, p. 24–34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000560](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000560)
6. CHONG, Heap Yih. LOPEZ, Robert. WANG, Jun. WANG, Xiangyu y ZHAO, Zeyu. Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects. In: Journal of Management in Engineering. November, 2016. Vol. 32, p. 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000460](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000460)
7. CRUZ-MACHADO, Virgilio y ROSA, Pedro. Modelo de planificación basado en construcción ajustada para obras de corta duración. En: Información Tecnológica. 2007. Vol. 18, no. 1, p. 107–118. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-07642007000100015&lng=es&nrm=iso&tlng=en
8. ELHAKEEM, Ahmed y HEGAZY, Tarek. Graphical Approach for Manpower Planning in Infrastructure Networks. In: Journal of Construction Engineering and Management. 2005. Vol. 131, no. February, p. 168–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:2\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(168))

9. GOMAR, Jorge E., HAAS, Carl T. y MORTON, David P. Assignment and Allocation Optimization of Partially Multiskilled Workforce. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. 2002. Vol. 128, no. April, p. 103–109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:2\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:2(103))
10. HEGAZY, Tarek. ELHAKEEM, Ahmed y ELBELTAGI, Emad. Distributed Scheduling Model for Infrastructure Networks. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. 2004. Vol. 130, no. April, p. 160–167. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:2\(160\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:2(160))
11. HO, Paul. H. K. Forecasting Construction Manpower Demand by Gray Model. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. Diciembre, 2010. Vol. 136, no. December, p. 1299–1305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000238)
12. LU, W., PENG, Y., SHEN, Q., & LI, H. (2012). A Generic Model for Measuring Benefits of BIM as a Learning Tool in Construction Tasks. In: *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(February), 441. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000585](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000585)
13. MALONEY, William. F. Strategic planning for human resource management in construction. In: *Journal of Management in Engineering*. 1997. Vol. 13, no. 3, p. 49–56. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1997\)13:3\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1997)13:3(49))
14. MEJÍA AGUILAR, Guillermo. HERNÁNDEZ C., Triny Carolina. Seguimiento de la productividad en obra: técnicas de medición de rendimientos de mano de obra. En: *Revistas UIS Ingenierías*. 2007. Vol. 6, no. 2, p. 45–59. <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/405>
15. NEPAL, Madhav Prasad., STAUB-FRENCH, Sheryl. POTTINGER, Rachel y ZHANG, Jiemin. Ontology-based feature modeling for construction information extraction from a Building Information Model. In: *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2013. Vol. 27, no. 5, p. 555–570. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000230)
16. NIE, Howard. STAUB-FRENCH, Sheryl y FROESE, Thomas. OLAP-integrated project cost control and manpower analysis. In: *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2007. Vol. 21, no. 3, p. 164–174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2007\)21:3\(164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2007)21:3(164))
17. PERSAD, Khali R. O'CONNOR, J. T. y VARGHESE, Koshy. Forecasting Engineering Manpower Requirements for Highway Preconstruction Activities. In: *Journal of Management in Engineering*. Mayo, 1995. Vol. 11, no. 3, p. 41–47. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(1995\)11:3\(41\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(1995)11:3(41))
18. PORRAS-DÍAZ, Hernán. SÁNCHEZ-RIVERA, Omar Giovanni. GALVIS-GUERRA, José Alberto. JAIMEZ-PLATA, Néstor Albeiro y CASTAÑEDA-PARRA, Karen Milady. Tecnologías “Building Information Modeling” en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concreto reforzado. En: *Entramado*. Enero – Junio, 2015. Vol. 11, no. 1, p. 230–249. <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21116>
19. PORRAS-DÍAZ, Hernán. SÁNCHEZ-RIVERA, Omar Giovanni. GALVIS-GUERRA, José Alberto. Metodología para la elaboración de modelos del proceso constructivo 5D con tecnologías “Building Information Modeling”. En: *Revista Gerencia Tecnológica Informática*. Enero – Abril, 2015. Vol. 14, no. 38, p. 59–73. <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistagti/article/view/4869>
20. QUIROGA LEÓN, César Augusto. Estudio de las ventajas y desventajas de la utilización de modelos BIM 5D y la herramienta Last Planner en la planificación de proyectos de edificación. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2015. 68 p.
21. SÁNCHEZ POLANCO, Lina Marithza. Análisis de rendimientos de mano de obra para actividades de construcción-Estudio de caso Edificio J UPB-. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil. Escuela de ingenierías y administración. 2009. 72 p.
22. SÁNCHEZ RIVERA, Omar Giovanni. Análisis del flujo de caja de la construcción de un proyecto con modelos BIM 5D y dinámica de sistemas. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2015.
23. SCHAFFER, Robert J. Manpower Planning-Make a “Moral Contract”. In: *Journal of Management in Engineering*. 1988. Vol. 4, no. 1, p. 56–59. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)9742-597X\(1988\)4:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)9742-597X(1988)4:1(56))
24. SHING-TAO, A. Work-Time Model for Engineers. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. March/April, 2001. Vol. 127, no. 2. p. 163–172. <http://ir.lib.ncku.edu.tw/bitstream/987654321/40082/1/3010601701002.pdf&embedded=true>
25. SHUJAA, Syed. SHAFIQ, Nasir y KHAMIDI, Mohd Faris. Prospects of Building Information Modeling (BIM) in Malaysian Construction Industry as Conflict Resolution Tool. 2013. In: *Journal of Energy Technologies and Policy*. Vol. 3, no. March 2016, p. 346–350. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/view/8582>
26. SING, Michael; LOVE, Peter E. D.; EDWARDS, J. y LIU, Junxiao. Dynamic Modeling of Workforce Planning for Infrastructure Projects. In: *Journal of Management in Engineering*. Noviembre, 2016. Vol. 32, no. 6, p. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000463)
27. SING, Chun-Pong. LOVE, Peter E. D. y TAM, Chi-Ming. Forecasting the Demand and Supply of Technicians in the Construction Industry. In: *Journal of Management in Engineering*. Mayo, 2014. Vol. 30, no. 3, p. 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000227)
28. SING, Chun-Pong. LOVE, Peter E. D. y TAM, Chi-Ming. Multiplier Model for Forecasting Manpower Demand. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. 2012. Vol. 138, no. 10, p. 1161–1168. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000529)
29. SU, Xing y CAI, Hubo. Enabling Construction 4D Topological Analysis for Effective Construction Planning. In: *Journal of Computing in Civil Engineering*. Enero, 2016. Vol. 30, no. 1, p. 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000463)
30. SU, Xing y CAI, Hubo. Life Cycle Approach to Construction Work-space Modeling and Planning. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. Julio, 2014. Vol. 140, no. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000855)
31. WU, Wei y ISSA, Raja. R. A. Key Issues in Workforce Planning and Adaptation Strategies for BIM Implementation in Construction Industry. Construction Research Congress, mayo, 2014.
32. WONG, James M.W. CHAN, Albert P. C. y CHIANG, Y. H. Modeling and Forecasting Construction Labor Demand: Multivariate Analysis. In: *Journal of Construction Engineering and Management*. Septiembre, 2008. Vol. 134, no. 9, p. 664–672. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:9\(664\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(664))