

Método para la medición del avance del proceso constructivo de un proyecto de construcción, a partir de la integración de fotogrametría y BIM

Alba Lucila Castellanos Olarte

Esthefanny Mora Morales

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Omar Giovanni Sánchez Rivera

Doctorado en Ingeniería - Gestión de Desarrollo Tecnológico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento al grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander por facilitar los modelos Revit y su colaboración en la captura de las fotografías.

Se agradece a los investigadores: Omar Giovanni Sánchez Rivera, Karen Milady Castañeda Parra, Jherson Jahir Bohórquez Castellanos, Guillermo Mejía Aguilar y Hernán Porras Díaz por los aportes conceptuales brindados en el desarrollo de la investigación.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco Teórico.....	15
1.1 Building information modeling – BIM.....	15
1.2 Fotogrametría.....	16
1.3 Integración: fotogrametría – BIM.....	17
2. Metodología	18
2.1 Verificación del programa de obra	19
2.2 Ajuste del modelo BIM 3D.....	21
2.3 Identificación de elementos y dimensiones	21
2.4 Fotografía de elementos y almacenamiento.....	22
2.4.1 Variables que interfieren en la medición	23
2.5 Estimación de dimensiones.....	25
2.5.1 Elementos en concreto	25
2.5.2 Elementos en acero	25
2.6 Almacenamiento de fotografías procesadas.....	26
2.7 Actualización del modelo BIM 3D.....	27
2.8 Comparación As-built / As-planning	27
3. Resultados	28
4. Discusión.....	32

4.1 Automatización de la metodología propuesta.....	32
4.2 Precisión de las distancias obtenidas por medio de la técnica fotogramétrica	32
4.3 Ventaja de la metodología propuesta.....	33
4.4 Ventaja de la integración de fotogrametría y BIM	33
4.5 Gestión de la información de la cuantificación del proceso constructivo	33
4.6 Otras posibles aplicaciones de la integración de BIM y fotogrametría	34
5. Conclusiones	34
6. Recomendaciones	35
Referencias Bibliográficas	37

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.	18
Figura 2. Metodología para la estimación del avance del proceso constructivo mediante la integración de BIM y fotogrametría.	19
Figura 3. Fases de construcción para el control del avance del proceso constructivo del edificio de Ingeniería Mecánica.	20
Figura 4. Integración mediante BIM de las diferentes disciplinas involucradas en la ejecución de un proyecto constructivo.	20
Figura 5. Ubicación del elemento de referencia para la captura de fotografías de elementos estructurales.	22
Figura 6. Medición de un elemento utilizando el perfil de intensidades (software imagej).....	24
Figura 7. Prototipo para la estimación de diámetros de aceros de refuerzo	25
Figura 8. Pruebas piloto del prototipo de medición de aceros.	26
Figura 9. Columna P-4, nivel 2 del edificio de Ingeniería Mecánica	29
Figura 10. Configuración de la escala del elemento de referencia en el software Imagej.....	29
Figura 11. Dimensionamiento del ancho, espesor y alto de la columna P-4 en el nivel 2, del edificio de Ingeniería Mecánica.....	30

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las aplicaciones y softwares evaluados para determinar el más óptimo en la medición de elementos estructurales a partir de fotos.	28
Tabla 2. Porcentaje de error entre el método tradicional y cantidades extraídas con fotogrametría.	31
Tabla 3. Porcentaje de error entre Revit y cantidades extraídas con fotogrametría.	31

Resumen

Título: Método para la medición del avance del proceso constructivo de un proyecto de construcción, a partir de la integración de fotogrametría y BIM*

Autores: Alba Lucila Castellanos Olarte
Esthefanny Mora Morales**

Palabras Claves: Avance de procesos constructivos, cantidades de obra, fotogrametría, Building Information Modeling, medición tradicional, as-built.

En la gestión de proyectos de construcción se estiman cantidades de obra en un tiempo determinado para la detección temprana de sucesos de atraso y sobrecosto. Usualmente la implementación de los métodos tradicionales en los procesos de estimación, evidencian alto consumo de tiempo y mano de obra, además de estar sujetos a errores sistemáticos. Para minimizar este problema se pueden emplear técnicas alternativas como la fotogrametría y los modelos building information modeling (BIM), que mediante la implementación de plataformas virtuales y la vinculación de una serie de imágenes optimizan los procesos de estimación de cantidades, dando como resultado una sistematización de la información, donde las diferentes disciplinas involucradas en el desarrollo del proyecto tendrán acceso en tiempo real del avance de la construcción identificando interferencias y posibles problemas que puedan retardar el cumplimiento de los objetivos propuestos. En este artículo se propone una solución mediante el planteamiento de una metodología basada en la extracción de cantidades de obra de algunos elementos estructurales del Edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, a partir de técnicas fotogramétricas y su almacenamiento en el modelo BIM del proyecto. Para establecer la viabilidad de la metodología propuesta, las cantidades son comparadas con las provenientes de la etapa de diseño de los modelos Revit y las calculadas de forma tradicional.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Abstract

Title: Method for measuring the progress of the construction process of a construction project, based on the integration of photogrammetry and BIM*

Author: Alba Lucila Castellanos Olarte
Esthefanny Mora Morales **

Keywords: Advance of constructive processes, quantities of work, photogrammetry, Building Information Modeling, traditional measurement, as-built

In the management of construction projects, work quantities are estimated at a specific time for the early detection of backward and over-cost events. Usually the implementation of traditional methods in the estimation processes, show high consumption of time and labor, besides being subject to systematic errors. To minimize this problem, alternative techniques such as photogrammetry and building information modeling (BIM) models can be used, which through the implementation of virtual platforms and the linking of a series of images optimize the quantity estimation processes, resulting in a systematization of information, where the different disciplines involved in the development of the project will have real-time access to the progress of the construction, identifying interferences and possible problems that may delay the fulfillment of the proposed objectives. In this article a solution is proposed by means of the approach of a methodology based on the extraction of quantities of work of some structural elements of the Building of Mechanical Engineering of the Industrial University of Santander, from photogrammetric techniques and its storage in the BIM model of the draft. To establish the feasibility of the proposed methodology, the quantities are compared with those coming from the design stage of the Revit models and those calculated in the traditional way.

* Project of grade

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Introducción

Los proyectos de construcción están ligados a distintas variables, que afectan directamente el desarrollo de los procesos constructivos, generando limitantes que interfieren en el cumplimiento de los objetivos en los tiempos previstos y los rangos de costos estimados (Bohn & Teizer, 2010). Una solución para disminuir los eventos de atrasos y sobrecostos es la cuantificación del avance de las actividades de construcción (Omar, Mahdjoubi, & Kheder, 2018), permitiendo llevar el control del progreso del proceso constructivo, detección y solución temprana de problemas, minimizando su impacto sobre el proyecto. Adicionalmente se puede realizar control de obra mediante la comparación de las tareas cumplidas respecto a las planeadas. Esta condición hace que el monitoreo as-built se caracterice como uno de los factores claves en la ejecución exitosa de un proyecto de construcción (Bosche & Haas, 2008); (Golparvar-Fard, Peña-Mora, & Savarese, 2015); (X. Zhang, y otros, 2009); (Navon, 2007).

Las actividades de control de proyectos de construcción son de gran relevancia, sin embargo, las metodologías empleadas han permanecido estables con el paso del tiempo, sin cambios aparentes, basándose en consumos excesivos de tiempos y mano de obra (Bohn & Teizer, 2010); (Navon, 2007). La innovación tecnológica ha permitido la generación de diversas herramientas que adecuan los procesos relacionados con proyectos de construcción de forma trascendental (Bohn & Teizer, 2010); (Teizer, 2015); (Omar, Mahdjoubi, & Kheder, 2018), no obstante, por falta de documentación, desconocimiento y temor a la implementación de nuevas técnicas, gran número de actividades residen en la labor manual (Bohn & Teizer, 2010).

Se ha dado paso a la invención de herramientas tecnológicas que permitan optimizar los procesos de representación visual y almacenamiento de información (Golparvar-Fard, Peña-Mora, & Savarese, 2015), dentro de las que se destaca la tecnología building information modeling (BIM), que se fundamenta en réplicas del proyecto que son elaboradas en entornos virtuales (Giovanny, Alberto, & Yerson, 2017) facilitando el almacenamiento, la integración y la comunicación de la información en una base de datos digital, durante cada uno de los procesos de un proyecto de construcción. Con BIM es posible la automatización de la estimación de cantidades de obra (Porrás-Díaz, Galvis-Guerra, Jaimez-Plata, & Castañeda-Parra, 2015), dado que proporciona una solución que garantiza una recopilación fácil y rápida de la información y su posterior almacenamiento y procesamiento de forma automática, cumpliendo con las actividades de detección, seguimiento y evaluación (Teizer, 2015).

En la determinación del avance del proceso constructivo, es indispensable un registro de datos del progreso de las actividades de construcción, asimismo la aplicación de métodos que faciliten información y respalden el proceso de toma de decisiones, donde resulta conveniente el uso de la fotogrametría, técnica de obtención de dimensiones mediante una o varias fotografías. La fotogrametría permite una estimación de cantidades automatizada y diligente, donde la obtención de información está ligada a los avances en dispositivos de captura y procesamiento fotográfico. En el monitoreo de procesos constructivos tiene la capacidad de minimizar la incertidumbre a partir de la generación de modelos texturados de alto nivel que proveen precisión en la obtención de dimensiones (Lu & Lee, 2017); (N. DATA, 2012).

Cumpliendo con las actividades de monitoreo de obra, la integración de la fotogrametría y las tecnologías BIM son de gran relevancia, dado que proveen una plataforma digital inteligente con información específica sobre características geométricas y aspectos físicos de los elementos, en

lapsos de tiempos definidos para el monitoreo (Lu & Lee, 2017); (Yang, Vela, & Golparvar-Fard, 2015), de igual forma se pueden gestionar la distribución del espacio en obra, deposición y disposición de materiales y equipos, seguridad del sitio, control de la calidad de los elementos construidos respecto a los diseños originales y manejo de los tiempos estipulados para cada actividad.

Partiendo del potencial de la integración de la fotogrametría y BIM, y de las dificultades para la medición del avance del proceso constructivo de un proyecto de construcción, surge la siguiente pregunta: ¿Cuál es la metodología para realizar la medición del avance del proceso constructivo con la integración de técnicas de fotogrametría y building information modeling? Para dar solución a este interrogante se diseña una metodología que permite la estimación del avance del proceso constructivo, a partir de la integración de técnicas fotogramétricas y BIM. Inicialmente se realiza la selección de una aplicación, para la estimación de dimensiones geométricas, posteriormente se plantea un método que integra las dos técnicas en estudio y finalmente, se hace la comparación de las cantidades de obra obtenidas con los datos estimados empleando la medición tradicional y los modelos Revit.

1. Marco Teórico

1.1 Building information modeling – BIM

Building information modeling (BIM), es una tecnología reciente en la industria de la construcción implementada en diversas organizaciones por las ventajas en visualización, almacenamiento, integración y accesibilidad de la información de construcción (Wang, Liu, Shou, Wang, & Hou, 2014), dicha tecnología trabaja en la recopilación de datos organizados en una base digital, la cual permite consultas ágiles y eficientes. BIM es útil en el análisis, producción y comunicación de la información de un proyecto de construcción (Lu, Peng, Shen, & Li, 2013); (Kim, 2012), mediante un sistema de comunicación que integra la información compartida entre los participantes del proyecto (Laine, Hänninen, & Karola, 2007); (Clevenger & Khan, 2014).

BIM es también definido como “una representación computarizada de las características físicas y funcionales de una instalación y su información del ciclo de vida, que utiliza estándares aprobados en la industria, para informar la toma de decisiones enfocadas al aumento del valor de los proyectos” (Kaner, Sacks, Kassian, & Quitt, 2008); (Volk, Stengel, & Schultmann, 2014).

La implementación de BIM proporciona una agilidad y economía en la creación y gestión de proyectos de construcción e infraestructura (Tang, Huber, Akinci, Lipman, & Lytle, 2010), adicionalmente brinda información con mayor exactitud en relación a la representación tradicional en dos dimensiones (2D) (Lee, Ham, & Lee, 2007), posicionando a BIM como una herramienta

esencial en el apoyo de procesos de monitoreo de obra, debido a su aporte en la optimización de actividades con el incremento de precisión y automatización en los procesos.

1.2 Fotogrametría

Según la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing –ASPRS, la fotogrametría es: “el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiable de objetos físico o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética y otros fenómenos” (ASPRS); (Carretero Segarra, 2015). La fotogrametría puede ser interpretada como la extracción de datos correspondientes a características geométricas de un elemento a partir de fotos (El-Omari & Moselhi, 2008), mediante las cuales es posible la reconstrucción de réplicas tridimensionales en formato digital (Souto-Vidal, Ortiz-Sanz, Gil-Docampo, & Gil-Docampo, 2015). La fotogrametría por ser un proceso automatizado es aplicable en varios campos como arqueología y patrimonio (Ducke, Score, & Reeves, 2011); (De Reu, y otros, 2013), arquitectura (Souto-Vidal, Ortiz-Sanz, Gil-Docampo, & Gil-Docampo, 2015), planificación urbana, control de proyectos de construcción (Omar, Mahdjoubi, & Kheder, 2018), prevención de desastres naturales (Rudorff, Rudorff, Kampel, & Ortiz, 2018), morfogénesis, entre otros. El avance en la tecnología permite la captura de fotografías con mayor calidad, facilitando la identificación de puntos de interés en distintas imágenes, funcionalidad con la que es posible determinar la posición espacial del elemento en el momento de la captura y la generación de modelos tridimensionales proyectables sobre planos 2D que pueden ser digitalizados utilizando CAD o BIM (Souto-Vidal, Ortiz-Sanz, Gil-Docampo, & Gil-Docampo, 2015).

1.3 Integración: fotogrametría – BIM

El estado del arte evidencia un límite de estudios sobre la integración de las técnicas fotogramétricas y BIM Sun et al. (Sun, Xu, Yuan, Liu, & Ren, 2017) plantea un método virtual para análisis óptico desde ventanas de edificios de diferente altura, mediante la integración de fotogrametría oblicua y Building information Modeling. Tuttas et al. (Tuttas, Braun, Borrmann, & Stilla, 2014) con el uso de fotografías y BIM se generan nubes de puntos as-built de los proyectos de construcción, haciendo un paralelo entre lo planeado y lo construido. Golparvar et al. (Golparvar-Fard, Peña-Mora, & Savarese, 2015) establecen una metodología para el registro de información del avance de una obra de construcción basada en la recopilación fotográfica de diferentes puntos del proyecto, empleando modelos probabilísticos bayesianos como análisis del progreso del proyecto mediante el modelo BIM. Faltýnová et al. (Faltýnová, Matoušková, Šedina, & Pavelka, 2016) proponen un método aplicado a la remodelación de fachadas en edificios partiendo de la documentación obtenida con escaneo láser y fotogrametría, requiriendo transferencia de datos a BIM. Loreado (Loredo Conde, 2017) Evalúa las ventajas adquiridas en la gestión de obra al implementar la integración de BIM y fotogrametría, observando reducción de costos y tiempos, al igual que optimización en toma de decisiones. García et al. (García, Nieto, & Moyano, 2016) Abordan un método centrado en la prevalencia del patrimonio histórico y arquitectónico de un edificio, soportado en técnicas fotogramétricas y BIM. Nieto et al. (D. D. E. Arquitectura, , 2014) presentan estudios y mediciones de construcciones civiles existentes para generar modelos BIM, con el uso de tecnologías como fotogrametría y escaneo láser en la extracción de datos geométricos.

2. Metodología

Para este caso de estudio se trabaja con el edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Figura 1.

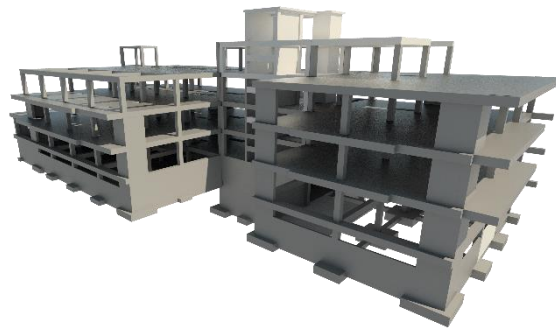


Figura 1. Edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

En la figura 2, se indica el método propuesto para la medición del avance del proceso constructivo fundamentado en la implementación de técnicas fotogramétricas y BIM, seguidamente se detallan cada uno de los procesos estipulados en el método.

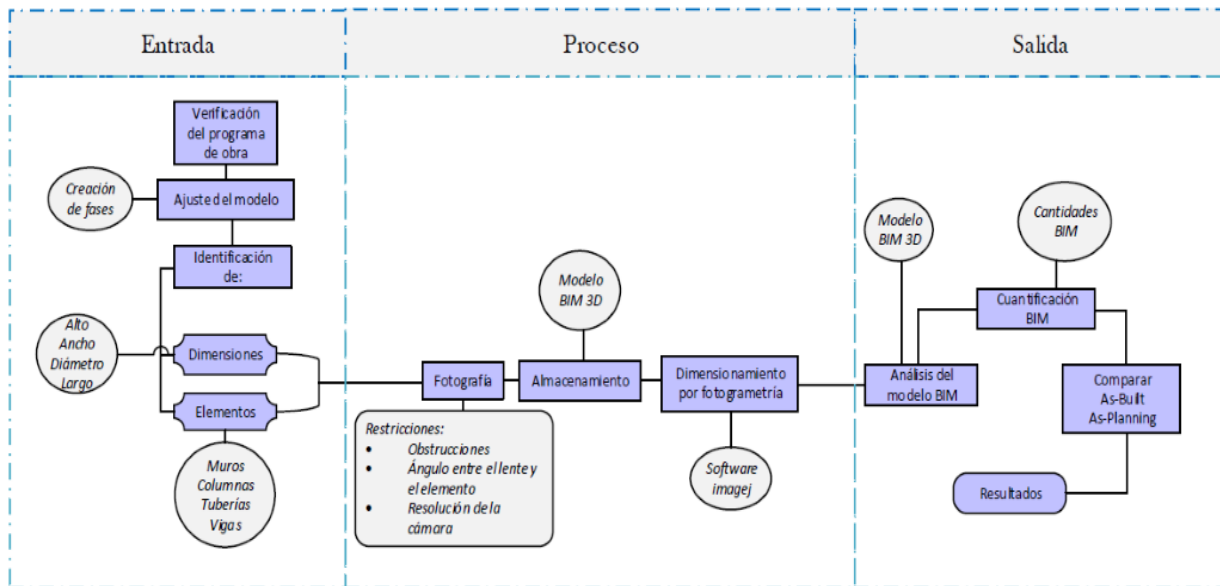


Figura 2. Metodología para la estimación del avance del proceso constructivo mediante la integración de BIM y fotogrametría.

2.1 Verificación del programa de obra

Previo a la cuantificación del progreso de las actividades constructivas, es necesario una revisión de la etapa de planeación, verificando el cumplimiento de las tareas propuestas en la W.B.S (Work Breakdown Structure) y el seguimiento de información de fechas y sucesión de actividades, dicha información permite programar los días de captura en campo (fotografías), al igual que los recursos humanos y tecnológicos requeridos en el control del proyecto. Una identificación de fases (figura 3) sujetas al seguimiento del proceso constructivo resulta apropiada en la etapa de verificación del programa de obra.

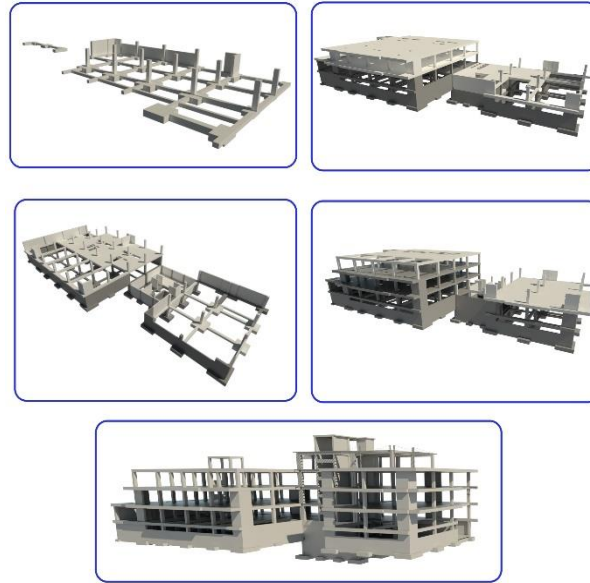


Figura 3. Fases de construcción para el control del avance del proceso constructivo del edificio de Ingeniería Mecánica.

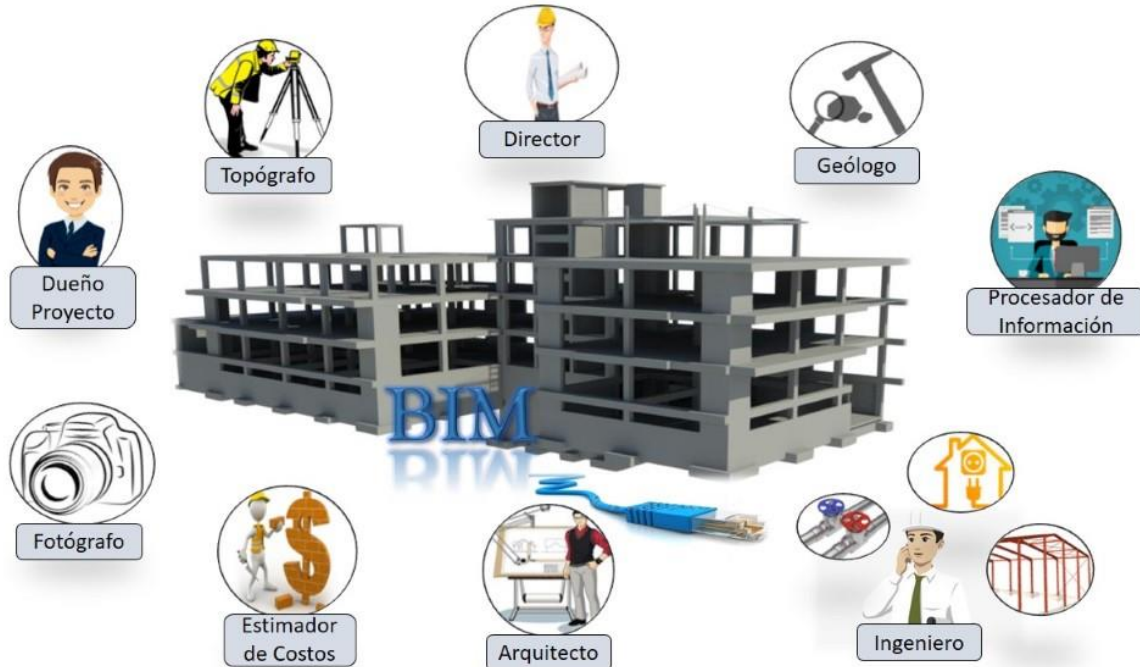


Figura 4. Integración mediante BIM de las diferentes disciplinas involucradas en la ejecución de un proyecto constructivo.

2.2 Ajuste del modelo BIM 3D

Realizar el ajuste del modelo BIM 3D planteado en la etapa de diseño, es indispensable debido que en la toma de fotografías se produce un volumen considerable de información, a lo que se propone una integración con el modelo BIM 3D, donde discretizar por fases resulta conveniente para agilizar el almacenamiento de información, siendo consecuente con el programa de obra inicial del proyecto.

Un dinamismo en el proyecto por parte de los diferentes participantes requiere accesibilidad y edición en tiempo real de la información sin importar la ubicación geográfica y desde cualquier dispositivo con acceso a una red de internet. La figura 4, hace alusión a la participación de las diferentes disciplinas para el desarrollo del proyecto constructivo del Edificio de Ingeniería Mecánica en el que cada participante realiza las modificaciones pertinentes a su área y a su vez está informado de las realizadas por los demás profesionales.

2.3 Identificación de elementos y dimensiones

Se da paso a la identificación y numeración de los elementos constructivos que serán evaluados mediante registro fotográfico en las fechas programadas y de esta forma establecer las correspondientes salidas de campo. Se tomará cada elemento, se determinará las dimensiones requeridas en su análisis geométrico y la cantidad de fotografías para su valoración con procedimientos o técnicas fotogramétricas. Es aconsejable elaborar un listado en una hoja electrónica (software Microsoft Excel) sujeta a actualizaciones y modificaciones, se sugiere el almacenamiento en plataformas de fácil accesibilidad, como nubes de datos (Google Drive,

OneDrive) que permite el libre acceso a la información desde cualquier equipo con conexión a internet.

2.4 Fotografía de elementos y almacenamiento

La obtención de fotografías hará correspondencia al listado de elementos y a las fechas estipuladas en la etapa de planificación del seguimiento, este proceso comienza con la identificación del objetivo y la ubicación del elemento de referencia (ver figura 5), culminando con la captura fotográfica y el registro adecuado de la actividad.



Figura 5. Ubicación del elemento de referencia para la captura de fotografías de elementos estructurales.

El personal encargado de la visita de campo debe situar el elemento de referencia en un plano bidimensional asegurándose de incluir la medida de interés, y así evitar posibles errores en el

proceso de cuantificación. En las actividades de recolección de información se puede optimizar los procesos de gestión, al contar con una conexión a internet apropiada en el dispositivo de captura para que su almacenamiento sea en tiempo real y a su vez con la participación simultánea de un funcionario en oficina encargado de la vinculación de las fotografías a los modelos BIM, generando reportes al personal de campo.

2.4.1 Variables que interfieren en la medición

Ángulo formado entre el dispositivo de captura y el elemento (β).

Distancia horizontal y resolución de la imagen (A): la separación entre el objeto en estudio y el lente de la cámara debe ser mínima, sin embargo, se debe verificar la inclusión total del elemento estructural en una sola captura.

Ubicación de la referencia (γ): en lo posible la superficie debe ser lisa y sin ninguna inclinación.

Para dar cumplimiento a estas variables de medición se requiere de un dispositivo o cámara de alta resolución con una aplicación de nivel garantizando que $\beta=0$, es decir que el dispositivo de captura se encuentre totalmente paralelo al elemento.

Las fotografías deberán ser almacenadas en tiempo real y estarán sujetas a modificaciones por parte de los encargados de su procesamiento, quienes deben generar reportes periódicos tomando como criterio de evaluación la calidad de la imagen para su posterior análisis en el software imagej.

El programa imagej requiere ingresar la magnitud del elemento de referencia para calibrar la imagen, en este caso se elaboró un listón de 1m de longitud con subdivisiones cada 20 cm delimitadas por los colores rosa y amarillo. Imagej trabaja con dimensiones representadas en pixeles, mostrando como resultado su equivalencia al relacionar la cantidad de pixeles respecto a

la magnitud real del elemento. Posteriormente se mide la superficie en estudio con la herramienta *straining*, obteniendo las dimensiones de interés. Esta técnica fotogramétrica se puede emplear en el dimensionamiento de redes (hidráulicas, sanitarias, eléctricas, etc.), elementos arquitectónicos (drawall, muros, puertas, etc.), elementos estructurales (vigas, columnas, muros estructurales, etc.) y cualquier elemento que tenga un registro fotográfico debidamente referenciado.

Para aumentar la precisión en las mediciones se puede generar un perfil de intensidades que relaciona el número de píxeles con la variación de colores, estableciendo los límites entre las diferentes tonalidades. En la figura 6 se representa el perfil de intensidades (distancia vs tonalidad de grises) que comprende la línea de medición, en este, se presentan cambios significativos en el extremo final, pasando de una tonalidad gris de 168 a 95, indicando la necesidad de ajustar la medida a la distancia correspondiente, datos tabulados en la misma figura.

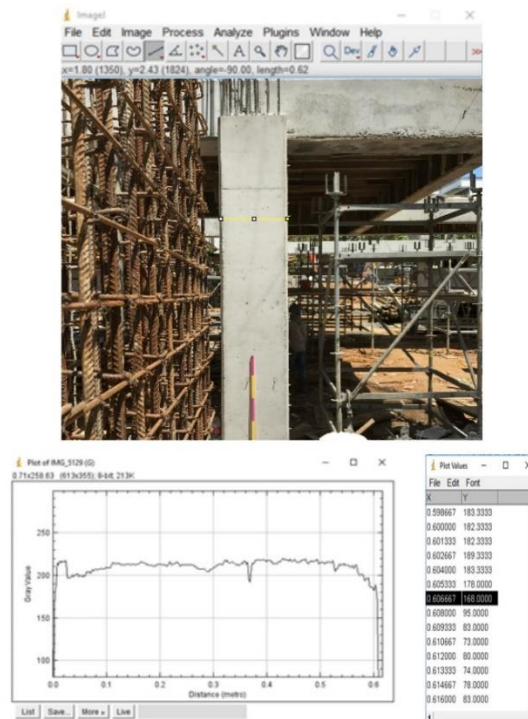


Figura 6. Medición de un elemento utilizando el perfil de intensidades (software imagej)

2.5 Estimación de dimensiones

2.5.1 Elementos en concreto Con la información fotográfica digitalizada e identificada debidamente en la nube de datos se procede a emplear las técnicas fotogramétricas, haciendo uso de los softwares de procesamiento y estimación de dimensiones. Se recomienda el software imagej debido a que cuenta con diversas herramientas (perfil de intensidades) que proporcionan alta precisión en las medidas, además de su fácil manejo y adquisición en el mercado.

2.5.2 Elementos en acero En la estimación de cantidades de aceros surge una limitante para emplear las técnicas fotogramétricas, la dificultad se presenta en el registro fotográfico de los diámetros de las barras y la extracción de medidas de magnitudes muy pequeñas. Se propone un prototipo con los diferentes diámetros comerciales (ver figura 7), para verificar que la distribución de acero de refuerzo dispuesto en obra corresponda al estipulado en los planos de diseño.



Figura 7. Prototipo para la estimación de diámetros de aceros de refuerzo

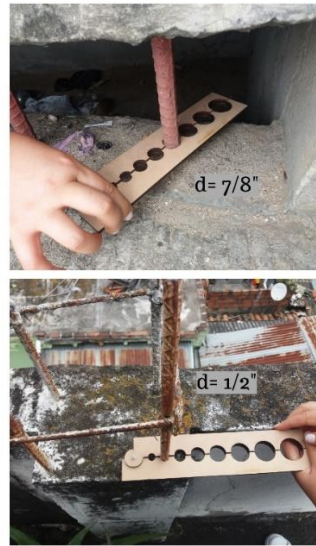


Figura 8. Pruebas piloto del prototipo de medición de aceros.

Para la estimación del diámetro en obra se sitúa el prototipo en la barra de acero de refuerzo, y se verifica el ajuste en cada uno de los orificios ($3/8''$, $1/2''$, $5/8''$, $3/4''$, $7/8''$, $1''$, $1- 1/8''$) hasta encontrar el que se adecua perfectamente, obteniendo así el valor del diámetro correspondiente. (ver figura 8)

2.6 Almacenamiento de fotografías procesadas

Una vez realizado el dimensionamiento de los parámetros físicos de interés en cada una de las fotografías, se realizará una tabulación de la información en el software Excel, cada elemento contará con una imagen representativa en la que se indiquen las medidas obtenidas. Estos datos deberán ser almacenados en una plataforma con capacidad de mantener la información en tiempo real al alcance de cada uno de los participantes del proyecto. Es factible utilizar una nube de datos como Google Drive o OneDrive, que permite cargar los archivos y su visualización desde cualquier dispositivo que tenga acceso a una red de internet.

2.7 Actualización del modelo BIM 3D

Las fotografías bidimensionales procesadas en el software de estimación de medidas se vincularán por medio de una nube de datos a las plataformas de modelamiento BIM, garantizando que cada elemento constructivo (estructural, arquitectónico) cuente con un soporte fotográfico del estado actual y su correspondiente descripción geométrica (cuantificación), lo que demanda la actualización del modelo BIM 3D elaborado en la etapa de planificación. Actualización que permitirá a cada participante del proyecto realizar un control de obra en tiempo real, sin una visita dispendiosa en obra y con automatización de la información, disminuyendo así tiempos y costos, e incrementando la calidad de la obra civil.

2.8 Comparación As-built / As-planning

Tomando las cantidades calculadas en Revit y por método tradicional, suministradas por el grupo de investigación de Geomática de la Universidad Industrial de Santander, se realizará un paralelo con las cantidades obtenidas mediante la implementación de fotogrametría y BIM para establecer la eficiencia de la metodología propuesta, calculando el porcentaje de error.

3. Resultados

En la selección del software de procesamiento y estimación de dimensiones se contemplaron características geométricas como largo, ancho y alto, para un muro, una columna y una tubería. Estas características geométricas no se lograron dimensionar por algunas aplicaciones como indica la x en la tabla 1. En otros casos se presentan variaciones altas de las medidas extraídas con las aplicaciones respecto a las reales. Sin embargo, Imagej y Lets Measure cuentan con alta precisión en el dimensionamiento de los elementos, siendo las opciones aptas para la implementación de técnicas fotogramétricas. Se eligió Imagej, porque permite trabajar desde un ordenador, proporcionando agilidad en la extracción de las medidas, almacenamiento de fotografías y procesamiento de información, mientras que Lets Measure trabaja in situ y requiere de un dispositivo inteligente con sistema Android, su capacidad de almacenamiento es limitado y presenta mayor dificultad para la toma de medidas.

Tabla 1.

Clasificación de las aplicaciones y softwares evaluados para determinar el más óptimo en la medición de elementos estructurales a partir de fotos.

	Medidas	Imagej	Smart Distance	Easy measure	Lets Measure	Magic Plan	Reales
Muro	Ancho (m)	1,51	1,7	1,6	1,52	1,62	1,5
	Largo (m)	2,23	2,6	2,25	2,28	2,27	2,23
	Alto (m)	1,28	1,4	x	1,42	x	1,28
Columna	Ancho (m)	0,17	0,2	x	0,176	0,17	0,174
	Largo (m)	0,42	0,5	x	0,422	0,4	0,422
	Alto (m)	2,64	x	x	2,62	x	2,79
Tubería	Largo (m)	1,06	x	x	1,0845	x	1,08
	Diametro (m)	0,11	x	x	0,1197	x	0,116

Las cantidades del dimensionamiento de columnas y muros, obtenidas con técnicas fotogramétricas se calcularon cumpliendo los siguientes pasos:

1. Captura fotográfica con el elemento de referencia.

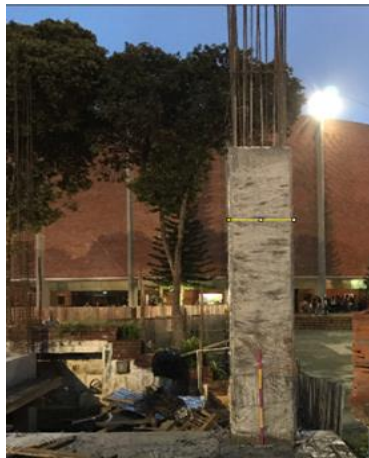


Figura 9. Columna P-4, nivel 2 del edificio de Ingeniería Mecánica

2. Dimensionamiento con el software Imagej

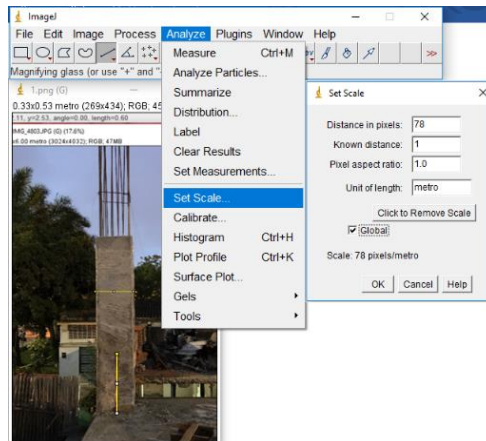


Figura 10. Configuración de la escala del elemento de referencia en el software Imagej.

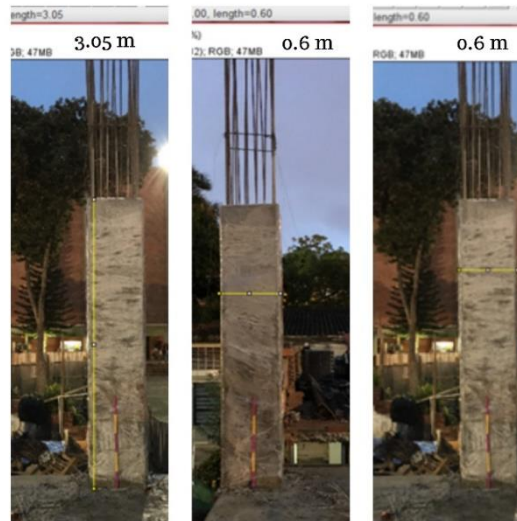


Figura 11. Dimensionamiento del ancho, espesor y alto de la columna P-4 en el nivel 2, del edificio de Ingeniería Mecánica

3. Cálculo del área y volumen

$$\text{Área} = \text{ancho} * \text{espesor}$$

$$\text{Área} = 0.6 * 0.6$$

$$\text{Área} = 0.36 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = \text{ancho} * \text{espesor} * \text{alto}$$

$$\text{Volumen} = 0.6 * 0.6 * 3.05$$

$$\text{Volumen} = 1.098 \text{ m}^3$$

$$\%error = \frac{V_{teo} - V_{exp}}{V_{teo}} * 100$$

Donde:

V_{teo} : Valor teórico

V_{exp} : Valor experimental

Los resultados de las columnas y muros evaluados se tabulan en las tablas 2,3.

Tabla 2.

Porcentaje de error entre el método tradicional y cantidades extraídas con fotogrametría.

Elemento	Tipo	Fotos		Tradicional		% Error	
		Área m ²	Volumen m ³	Área m ²	Volumen m ³	Área %	Volumen %
O-5	Colu	0,360	1,264	0,360	1,287	0,000	1,818
O-4	Colu	0,366	1,274	0,368	1,315	0,495	3,140
M-4	Colu	0,360	1,249	0,363	1,298	0,828	3,741
L-4	Colu	0,360	1,202	0,355	1,270	1,351	5,311
P-3	Colu	0,372	1,358	0,369	1,319	0,826	2,942
O-3	Colu	0,360	1,260	0,374	1,337	3,724	5,744
N-3	Colu	0,360	1,210	0,364	1,302	1,156	7,101
M-3	Colu	0,360	1,220	0,367	1,313	1,968	7,041

Tabla 3.

Porcentaje de error entre Revit y cantidades extraídas con fotogrametría.

Elemento	Tipo	Fotos		Revit		% Error	
		Área m ²	Volumen m ³	Área m ²	Volumen m ³	Área %	Volumen %
O-5	Colu	0,360	1,264	0,360	1,287	0,000	1,818
O-4	Colu	0,366	1,274	0,360	1,287	1,667	1,035
M-4	Colu	0,360	1,249	0,360	1,287	0,000	2,937
L-4	Colu	0,360	1,202	0,360	1,287	0,000	6,573
P-3	Colu	0,372	1,358	0,360	1,287	3,361	5,530
O-3	Colu	0,360	1,260	0,360	1,287	0,000	2,098
N-3	Colu	0,360	1,210	0,360	1,287	0,000	6,014
M-3	Colu	0,360	1,220	0,360	1,287	0,000	5,175
E1'-2	Muro	9,468	2,93508	9,6525	2,89575	1,911	1,358
2E-F	Muro	10,064	2,11344	9,11625	1,82325	10,396	15,916

4. Discusión

4.1 Automatización de la metodología propuesta

Con el uso de los métodos tradicionales de control de cantidades es evidente el alto nivel de consumo de tiempo y mano de obra, a esto se suma la complejidad de la interpretación adecuada del modelo, que genera pérdida de tiempo y errores sistemáticos en la ejecución. Mientras que, con la integración de las técnicas fotogramétricas y BIM, se optimizan los procesos de estimación de cantidades de obra, gracias a la recopilación, sistematización de la información en lapsos de tiempo más cortos y la interacción en tiempo real de las diferentes disciplinas que integran el proyecto.

4.2 Precisión de las distancias obtenidas por medio de la técnica fotogramétrica

La precisión de las dimensiones obtenidas con las técnicas fotogramétricas está directamente relacionada con la calidad de las fotos y la precisión durante el procesamiento de éstas, en el software imagej. En las tablas 2-3, se evidencia alto grado de precisión en las medidas evaluadas, con porcentajes de error muy bajos para columnas, sin embargo, para los muros este valor es un poco alto, debido al nivel variable de la superficie sobre la que se construyeron estos elementos estructurales y presencia de oclusiones durante la captura de las fotografías.

4.3 Ventaja de la metodología propuesta

En el desarrollo de la metodología se involucran métodos fotogramétricos basados en la implementación del software imagej para extraer dimensiones de elementos estructurales, a partir de fotos tomadas bajo ciertas condiciones que propician un escenario de mayor calidad y al ser vinculados con la plataforma BIM aumenta la confiabilidad de los resultados.

4.4 Ventaja de la integración de fotogrametría y BIM

Combinando las técnicas de fotogrametría y BIM, se obtiene un método de evaluación y monitoreo de gran calidad, donde se puede comparar el avance real de la obra con el modelo de representación 3D.

4.5 Gestión de la información de la cuantificación del proceso constructivo

Con la implementación de una plataforma digital que almacena la información fotográfica y cantidades de obra en una nube de datos, generando el modelo virtual del proyecto en tiempo real, se facilita la gestión de proyectos constructivos, pues se tiene cuantificado el avance del proceso constructivo en lapsos de tiempo acordes con el desarrollo de las actividades que conforman las rutas críticas, garantizando el cumplimiento de estas en el tiempo estimado.

4.6 Otras posibles aplicaciones de la integración de BIM y fotogrametría

La metodología planteada en este artículo, no solo sirve para medir elementos estructurales, puede ser empleada en la estimación geométrica de elementos arquitectónicos, redes, y cualquier superficie u objeto del cual se tengan fotografías debidamente referenciadas.

5. Conclusiones

La metodología planteada permite hacer la medición del avance del proceso constructivo con la implementación e integración de técnicas fotogramétricas y building information modeling, reduciendo significativamente el tiempo y costo requerido, además de llevar un control detallado de las cantidades y procesos en la obra.

El análisis de la eficiencia y precisión de las aplicaciones en el dimensionamiento de elementos estructurales y redes, evidencia que el programa más óptimo para implementar técnicas fotogramétricas es imagej (tabla 1), puesto que dispone de la mayoría de herramientas necesarias. Este software es de fácil acceso, su interfaz está diseñada de tal forma que el usuario comprende rápidamente sus funciones y está en capacidad de arrojar los valores reales de distancias y áreas a partir de fotografías que tengan un elemento de referencia conocido.

En los resultados listados en las tablas 2,3, se evidencia el error porcentual de la estimación del área y el volumen de los elementos estructurales, analizados con las diferentes metodologías

propuestas. De esta forma se puede concluir que la integración de la fotogrametría y BIM es una herramienta factible para la cuantificación en obra.

Los resultados listados en las tablas 2,3, demuestran que es aceptable el grado de exactitud en el procesamiento fotogramétrico con imagej, al estimar un error porcentual de las propiedades geométricas, respecto a la metodología tradicional y el modelo Revit.

El manejo de la información por parte de los entes involucrados en el proyecto es mucho más eficiente cuando se trabaja con modelos BIM vinculando la fotogrametría, pues se tiene una representación real del avance en cualquier fase del proyecto. La asignación de actividades en obra requiere un soporte proporcionado por los modelos BIM y fotogrametría, brindando flexibilidad ante los cambios en los diseños a los que están sujetos comúnmente los proyectos de construcción, sin alterar las rutas críticas y garantizando la entrega de la obra en el tiempo estimado.

La metodología propuesta adicionalmente, puede ser empleada para el control del avance del proceso constructivo de proyectos de infraestructura, enfocados en el área de geotecnia, hidráulica, diseño vial y demás áreas de profundización, puesto que la extracción de medidas por técnicas fotogramétricas es viable, independientemente del elemento a medir y la representación BIM es amplia por sus diversas plataformas con área de profundización específica.

6. Recomendaciones

Se recomienda el cumplimiento de la metodología planteada para la captura de fotografías, enfatizando en las variables que pueden interferir en la estimación de cantidades con el software de procesamiento de imágenes imagej.

Otro parámetro importante es el orden en la sistematización de la información al registrar y almacenar las dimensiones geométricas extraídas de las fotos para ser vinculadas en el modelo Revit.

En el dimensionamiento fotográfico por imagej se recomienda usar el perfil de intensidades para obtener mayor precisión en las medidas.

Para investigaciones futuras se recomienda profundizar en la reducción de variables que afectan el dimensionamiento, minimizando el número de fotografías necesarias para la extracción de medidas.

Indagar más sobre el dimensionamiento de aceros de refuerzo, en la estimación de longitudes y diámetros a partir de fotografías, considerando parámetros que dificultan dicha estimación.

Referencias Bibliográficas

ASPRS . (s.f.). *Imaging and Geospatial Society*. Obtenido de <https://www.asprs.org/>

Bohn, J. S., & Teizer, J. . (2010). Benefits and barriers of construction project monitoring using high-resolution automated cameras. *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 136, no. 6, 632–640.

Bosche, F., & Haas, C. T. (2008). Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images. *Autom. Constr.*, vol. 17, no. 4, 499–512.

Carretero Segarra, S. (2015). Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un vehículo aéreo no tripulado. 1–60.

Clevenger, C. M., & Khan, R. (2014). Impact of BIM-Enabled Design-to-Fabrication on Building Delivery. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 19, no. 1, 122–128.

D. D. E. Arquitectura, . (2014). Implementación de las nuevas técnicas de levantamiento en el sistema BIM (Building Information Modeling). 104–113.

De Reu, J. P., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., . . . De Clercq, W. (2013). “Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *J. Archaeol. Sci.*, vol. 40, no. 2, 1108–1121.

Ducke, B., Score, D., & Reeves, J. (2011). Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series. *Comput. Graph.*, vol. 35, no. 2, 375–382.

El-Omari, S., & Moselhi, O. (2008). Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 1, 1–9.

- Faltýnová, M., Matoušková, E., Šedina, J., & Pavelka, K. (2016). Building facade documentation using laser scanning and photogrammetry and data implementation into BIM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. July, 215–220.
- García, A., Nieto, E., & Moyano, J. (2016). El palacio de los niños de don gome (andújar, jaén), gestionado desde un proyecto h-bim. 238–246.
- Giovanny, O., Alberto, S. J., & Yerson, G. H. (2017). BrIM 5D models and Lean Construction for planning work activities in reinforced concrete bridges Modelos BrIM 5D y Lean Construction para planificar actividades de. *vol. 26, no. 46.*, 39–50.
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & Savarese, S. (2015). Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 1, 04014025.
- Kaner, I., Sacks, R., Kassian, W., & Quitt, T. (2008). “Case studies of BIM adoption for precast concrete design by mid-sized structural engineering firms. *Electron. J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 13, no. June, 303–323.
- Kim, J.-L. (2012). Use of BIM for Effective Visualization Teaching Approach in Construction Education. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, vol. 138, no. 3, 214–223.
- Laine, T., Hänninen, R., & Karola, A. (2007). Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Build. Simul. 2007*, vol. 138, no. March, 1455–1461.
- Lee, C., Ham, S., & Lee, G. (2007). The Development of Automatic Module for Formwork Layout using the BIM. *System*, vol. 3, 8–10.
- Loredo Conde, A. J. (2017). *Aplicación de sistemas BIM y fotogrametría en implantación de modelos de franquicias.*
- Lu, Q., & Lee, S. (2017). Image-Based Technologies for Constructing As-Is Building Information Models for Existing Buildings. *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 4, 04017005.
- Lu, W., Peng, Y., Shen, Q., & Li, H. (2013). Generic Model for Measuring Benefits of BIM as a Learning Tool in Construction Tasks. *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 139, no. 2, 195–203.

- N. DATA. (2012). Photo-modeling for Construction Site Space Planning. *No Data, no. Dc.*, 1350–1359.
- Navon, R. (2007). Research in automated measurement of project performance indicators. *Autom. Constr.*, vol. 16, no. 2, 176–188.
- Omar, H., Mahdjoubi, L., & Kheder, G. (2018). “Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities,” . *Comput. Ind.*, vol. 98, 172–182.
- Porras-Díaz, H. S.-R., Galvis-Guerra, J. A., Jaimez-Plata, N. A., & Castañeda-Parra, K. M. (2015). “Tecnologías ‘Building Information Modeling’ en la elaboración de presupuestos de construcción de estructuras en concreto reforzado. *Entramado*, vol. 11, no. 1, 230–249.
- Rudorff, N., Rudorff, C. M., Kampel, M., & Ortiz, G. (2018). Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*
- Souto-Vidal, M., Ortiz-Sanz, J., Gil-Docampo, G., & Gil-Docampo, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. *Inf. la Construcción*, vol. 67, no. 539, e107.
- Sun, T., Xu, Z., Yuan, J., Liu, C., & Ren, A. (2017). Virtual Experiencing and Pricing of Room Views Based on BIM and Oblique Photogrammetry. *Procedia Eng.*, vol. 196, no. June, 1122–1129.
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 7, 829–843.
- Teizer, J. (2015). Status quo and open challenges in vision-based sensing and tracking of temporary resources on infrastructure construction sites. *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, no. 2, 225–238.
- Tuttas, S., Braun, A., Borrmann, A., & Stilla, U. (2014). Comparison of photogrammetric point clouds with BIM building elements for construction progress monitoring. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 40, no. 3, 341–345.

- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Autom. Constr.*, vol. 38, 109–127.
- Wang, J., Liu, J., Shou, W., Wang, X., & Hou, L. (2014). Integrating building information modelling and firefly algorithm to optimize tower crane layout. *31st Int. Symp. Autom. Robot. Constr. Mining, ISARC 2014 - Proc.*, no. Isarc, 321–328.
- X. Zhang, N. B., Ibrahim, Y. M., Wu, S., Kagioglou, M., Aouad, G. K., & Trucco, E. (2009). Automating progress measurement of construction projects. *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 3, 294–301.
- Yang, J. P., Vela, P. A., & Golparvar-Fard, M. (2015). Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future. *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, no. 2, 211–224.