

Modelación multidimensional: un mecanismo de mejora para la gestión de proyectos de construcción

Multidimensional modeling: an improvement mechanism for the Management of construction projects

Luis E. Izaguirre
Luis F. Alarcón

Resumen

La “Modelación Multidimensional” es la representación digital, visual y automatizada de las diversas dimensiones de un proyecto, utilizando software comercialmente disponibles o una herramienta computacional única. Una “dimensión” es cualquier variable que el profesional necesita conocer y analizar para gestionar un proyecto de construcción, y puede ser utilizada durante todo el ciclo de vida del proyecto, desde el diseño hasta la operación. Las dimensiones modeladas fueron superficie, espacio, tiempo, secuencia constructiva y estrategia de ejecución, cubicación y cantidad, costo, seguridad, e historial de desempeño de actividades. *Lean Construction* se ofrece como el marco teórico conveniente para dirigir la investigación y experimentación práctica de la Tecnología de la Información (TI) en los procesos. Se utilizaron indicadores de desempeño para evaluar el uso de la modelación propuesta como un mecanismo de mejora en la gestión de proyectos. La validación y evaluación de la modelación multidimensional se llevó a cabo con el método prueba-error utilizando tres casos de estudio (proyectos de edificación chilenos). El uso de la modelación multidimensional simplificó e hizo más transparente los procesos de planificación, control y coordinación de los proyectos en estudio durante su ejecución. Esto se reflejó en el incremento de la disponibilidad, consistencia, facilidad de acceso y confiabilidad de la información del proyecto, en la reducción de la incertidumbre que tuvieron los profesionales y trabajadores en general respecto al alcance y desempeño del proyecto, en el aumento de la velocidad y calidad del proceso de toma de decisiones, y en la mejora del entendimiento y la comunicación entre los participantes del proyecto.

Palabras claves: Tecnología de la Información. *Lean Construction*. Modelación Multidimensional. Gestión. Construcción.

Abstract

Multidimensional modeling is the digital, visual, automated representation of the different parts of a project, using commercially available software or a single computational tool. A “dimension” is any variable that a professional needs to know and analyze in order to manage a construction project, which can be used during the entire life cycle of the project, from design to operation. The modeled dimensions were surface area, space, time, building sequence and execution strategy, cubage and quantity, cost, safety, and history of activities. Lean Construction was considered as an adequate theoretical Framework for guiding the investigation and empirical testing of the information technology in the processes. Performance indicators were used to evaluate the use of the proposed modeling method as a tool to improve project management. The method of trial and error using three cases (construction projects in Chile) was used to validate and to evaluate that method. The use of multidimensional modeling made the processes of planning, control, and coordination of the studied project cases easier and more transparent. It resulted in higher availability, consistency, accessibility, reliability of information, reduction of uncertainty for professionals and workers in general in terms of project scope and performance, faster and better decision-making, and better understanding and communication among project participants.

Keywords: Information Technology. *Lean Construction*. Multidimensional Modeling. Management, Construction.

Luis E. Izaguirre
JJC Contratistas Generales S.A.
Av. República de Chile 388
piso 9, Jesús María.
Tel.: 433-1080
Telefax : 433-2823
E-mail: leizagui@uc.cl

Luis F. Alarcón
Universidade Católica do Chile
Santiago, Chile
Escuela de Ingeniería
Casilla 306, Correo 22,
Santiago, Chile
Fax: 011-562-686-4806
E-mail: lalarcon@ing.puc.cl

Recebido em 21/10/06
Aceito em 03/08/08

Antecedentes

La Tecnología de la Información (TI) es el conjunto de conocimientos referidos a la producción, distribución, almacenamiento, recuperación y utilización de la información. Los tres elementos importantes de la TI son las herramientas (Ej. software y hardware), las personas (Ej. facilitadores y usuarios) y los procesos de trabajo necesarios para implementar y utilizar la TI eficazmente en la gestión de proyectos de construcción (Rischmoller y Alarcón 2005) (RISCHMOLLER *et al.*, 2006).

En la actualidad, a nivel mundial, se investigan, desarrollan y/o aplican modelos que representan digitalmente la información del proyecto y el conocimiento de los profesionales (Ej. modelos digitales 3D y 4D), cuya finalidad es predecir fiel y oportunamente el alcance y desempeño del proyecto, y facilitar el proceso de toma de decisiones en las etapas iniciales del mismo. Sin embargo, estos modelos sólo son utilizados en proyectos de gran envergadura y/o en países con gran avance tecnológico.

En este artículo se discute se presentan varios casos de estudio de modelación digital en proyectos de diversa envergadura y se discute su impacto desde el enfoque de Lean Construction. *Lean Construction* es un enfoque de gestión de producción que proporciona un marco teórico muy conveniente para entender la necesidad y el impacto de la TI por medio de una serie de principios de gestión (KOSKELA, 2000) (RISCHMOLLER; ALARCÓN, 2005). *Lean Construction* propone principios de gestión y formas de mejorar el desempeño de los proyectos (LICHTIG, 2006) cuya implementación puede ser facilitada por la implementación de TI. Al mismo tiempo, la implementación de TI en proyectos y su impacto puede ser mejor comprendido desde las distintas perspectivas de gestión que ofrece el enfoque de *Lean Construction* (RISCHMOLLER, *et al.* 2006). Por ejemplo, uno de los principios fundamentales de *Lean Construction* es la reducción de la variabilidad e incertidumbre en los proyectos para lograr un flujo continuo de trabajo y la TI contribuye de manera fundamental a la aplicación del mismo: el reemplazo de los documentos y herramientas tradicionales (planos, especificaciones técnicas, diagramas Gantt, esquemas 2D, curvas “S”, etc.) por herramientas avanzadas de TI permite reducir enormemente la variabilidad e incertidumbre al incrementar la capacidad de predecir, entender y comunicar a los diversos participantes del proyecto el alcance y desempeño del mismo. La aplicación de TI permite también un incremento en la transparencia y el valor del producto en las diversas etapas de desarrollo. Varios de estos impactos

fueron observados en los casos que se describen mas adelante.

Modelación multidimensional en la etapa de ejecución del proyecto

La Modelación Multidimensional es la representación digital, visual y automatizada de las diversas dimensiones de un proyecto, utilizando software comercialmente disponibles o una herramienta computacional única. Una Dimensión es cualquier variable que el profesional necesita conocer y analizar para gestionar un proyecto de construcción, y puede ser utilizada durante todo el ciclo de vida del proyecto, desde el diseño hasta la operación. Algunos ejemplos de dimensiones son espacio, tiempo, cantidad, costo, seguridad, recursos, habitabilidad, etc. (IZAGUIRRE, 2006)

Actualmente, en el mundo, existen dos líneas de investigación relacionadas con la Modelación Multidimensional: “nD Modelling” desarrollada en la Universidad de Salford, Inglaterra y *Virtual Design and Construction* desarrollada en la Universidad de Stanford, USA. La primera línea de investigación tiene como objetivo crear un modelo multidimensional a partir de una herramienta computacional única (SCRI, 2003) y la segunda busca desarrollar modelos multidimensionales utilizando software comercialmente disponible proponiendo metodologías que integran y facilitan la interacción de los equipos de proyecto (STANFORD, 2008) (FISCHER; KUNZ, 2004). Ambas líneas de investigación se enmarcan actualmente en la etapa de diseño porque la utilización temprana del modelo crea mayores beneficios a los participantes del proyecto (Ej. mandante, diseñador, constructor, etc.); sin embargo, existen sectores de la industria de la construcción que se muestran renuentes a implementar el modelo desde el diseño (enfoque *push*¹) porque todavía no visualizan los beneficios potenciales de su utilización.

Paralelamente al enfoque *push*, debiera existir un enfoque *pull*², que consiste en la implementación

¹ El enfoque *push* consiste en crear beneficios tangibles durante la etapa de diseño utilizando TI y transmitir dichos beneficios a las etapas siguientes del proyecto (Ej. Construcción) para que sus profesionales se motiven a utilizar TI en sus respectivas labores.

² El enfoque *pull* consiste en crear beneficios tangibles durante la etapa de ejecución o construcción utilizando TI y transmitir dichos beneficios a las etapas iniciales (Ej. Diseño) de proyectos futuros para que sus profesionales se motiven a utilizar TI en sus respectivas labores.

del modelo en la etapa de ejecución del proyecto y tiene como objetivo mostrar beneficios concretos a los demás participantes del proyecto y lograr su uso en etapas iniciales del mismo.

***Lean construction*: marco teórico conveniente para investigar en tecnología de la información**

Lean Construction es un enfoque basado en la gestión de producción, que se ofrece como el marco teórico conveniente para dirigir la investigación y experimentación práctica de TI en los procesos de diseño, planificación, construcción y abastecimiento de proyectos. Koskela (2000) ha propuesto analizar la producción en la construcción desde tres perspectivas: transformación, flujo y valor, proponiendo lo que se denomina modelo TFV. La perspectiva más convencional es la correspondiente a la Transformación de insumos recursos e información en nuevos productos y que permite observar directamente pérdidas de producción, productividades y otros aspectos convencionales de producción. La producción como un flujo de recursos e información entrega una perspectiva que permite diferenciar claramente actividades que agregan valor (generalmente de transformación) de aquellas que no agregan valor y observar claramente el impacto de la variabilidad en los procesos y la participación de la agregación de valor en el proceso completo. La visión de la producción como un proceso de creación de valor, donde es importante crear valor y evitar las pérdidas de valor a lo largo del proceso de desarrollo del proyectos, es muy importante complemento de las otras dos visiones y es fundamental para analizar el impacto de TI en el procesos de diseño. Estas tres visiones de la producción permiten un análisis más completo de la necesidad y del impacto de la TI en los proyectos. Una visión completa del desarrollo del proyecto ha sido propuesta por Ballard (2000) en lo que se ha denominado el *Lean Project Delivery System* que incluye cuatro fases que se interconectan: Definición del Proyecto, Diseño, Abastecimiento y Ensamblaje. La TI juega un rol integrador para conectar estas fases y poner en práctica este modelo permitiendo que estas propuestas se hagan realidad. El rol interactivo de las TI y *Lean Construction* ha sido revisado en casos de estudio previos (RISCHMOLLER; ALARCÓN, 2005) (RISCHMOLLER *et al*, 2006) (KHANZODE *et al*, 2005).

Lean Construction propone una serie de principios cuya aplicación se ve enormemente facilitada por la TI y cuyo impacto se traduce en mejoras del desempeño de los proyectos, entre aquellos

directamente observados en los casos de estudio están:

- (a) Captura y generación de valor;
- (b) Reducción de variabilidad en procesos;
- (c) Reducción de tiempos de ciclos; y
- (d) Simplificación y aumento de la transparencia en los procesos.

Estos son principios cuya aplicación fue posible observar con la modelación multidimensional y que permiten contrarrestar directamente la complejidad e incertidumbre de los proyectos.

No es posible en este artículo profundizar en las bases teóricas de la filosofía *Lean Construction*, el lector puede revisar Koskela (2000), Ballard (2000) e Lichtig (2006) para una descripción más completa del *Lean Project Delivery System*.

Alcance de la investigación

La investigación y aplicación de la TI se debe realizar buscando beneficios locales (Ej. en cada sector) y no beneficios en toda la industria de la construcción (EASTMAN *et al.*, 2002). Por este motivo, la investigación se enfocó en la implementación de la modelación multidimensional en proyectos del Sector Edificación Chileno, durante la etapa de ejecución (enfoque *pull*).

Las nueve dimensiones estudiadas y modeladas fueron: Superficie (2 primeras dimensiones), Espacio (3 primeras dimensiones), Tiempo (cuarta dimensión), Secuencia Constructiva y Estrategia de Ejecución (quinta dimensión), Cubicación y Cantidad (sexta dimensión), Costo (séptima dimensión), Seguridad (octava dimensión) e Historial de Desempeño (novena dimensión).

Durante la investigación se desarrollaron dos tipos de modelación multidimensional; uno de ellos tuvo como base un modelo digital tridimensional (espacio) y el otro un modelo digital bidimensional (superficie). A partir de los modelos base se fueron incorporando nuevas dimensiones (4ta., 5ta., 6ta.,..., 9na. dimensión).

Se utilizaron software comercialmente disponibles para elaborar los modelos multidimensionales: software de modelación y cubicación³, software de planificación y control⁴, software de visualización y navegación virtual⁵, software de hoja de cálculo⁶ y software de base de datos⁷.

³ Se utilizó Autodesk Architectural Desktop (ADT)

⁴ Se utilizó Primavera Project Planner® (Primavera P3)

⁵ Se utilizó SmartPlant Review (SPR)

⁶ Se utilizó Microsoft Excel

⁷ Se utilizó Microsoft Access

Validación y evaluación de la modelación multidimensional utilizando casos de estudio

Validar la estructura y el funcionamiento del modelo multidimensional significó comprobar que éste representó y mostró correctamente la información y conocimiento que se tenía de cada uno de los proyectos en estudio. Se utilizaron indicadores de desempeño para evaluar el uso de la modelación propuesta como un mecanismo de mejora en la gestión de proyectos. Ambos procesos se llevaron a cabo con el método prueba-error utilizando tres casos de estudio.

Indicadores de desempeño

La mayoría de los indicadores utilizados fueron cualitativos y los resultados de éstos se obtuvieron gracias a las entrevistas y encuestas realizadas a profesionales de la construcción que participaron en los proyectos en estudio. La encuesta fue enviada por correo electrónico a 40 profesionales del sector edificación (antes y después de la implementación de la modelación multidimensional); se recibieron 11 respuestas a la encuesta. Los datos obtenidos no fueron suficientes para validar estadísticamente los resultados; sin embargo, muestran una tendencia clara sobre las mejoras obtenidas al utilizar este tipo de modelación en la gestión de proyectos de edificación. Los indicadores de desempeño utilizados fueron los siguientes:

- (a) Número de cambios en el diseño realizados con anticipación;
- (b) Número de incongruencias en los documentos de diseño;
- (c) Grado de dificultad para predecir e imaginar el alcance del proyecto;
- (d) Nivel de velocidad y calidad del proceso de toma de decisiones;
- (e) Grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los participantes;
- (f) Grado de eficiencia para manejar la información del control del proyecto;
- (g) Nivel de precisión en las cubriciones del proyecto;
- (h) Grado de eficiencia en el manejo de las cantidades y costos del proyecto;
- (i) Nivel de predicción de los riesgos de accidente;
- (j) Número de cambios en la secuencia constructiva y en la estrategia de ejecución;
- (k) Nivel de facilidad para detectar los elementos no planificados del proyecto; y

- (l) Nivel de automatización del proceso de actualización de información.

Los beneficios de la utilización de la modelación multidimensional en los casos de estudio muestran un impacto positivo sobre el desempeño de los proyectos de construcción al utilizar este tipo de modelos. En el Caso 1 el impacto positivo se demostró hallando la relación entre los profesionales que percibieron una mejora en su proyecto respecto al total de encuestados. En el Caso 2 se contaba con resultados cuantitativos de un proyecto similar en que había participado el mismo equipo de proyecto, quienes pudieron realizar comparaciones más precisas y directas de los indicadores cuantitativos como se indica más adelante. En el caso 3 los resultados se obtuvieron principalmente en base a entrevistas.

Casos de estudio

La modelación multidimensional fue utilizada en tres casos de estudio (proyectos de edificación chilenos) para mejorar en cada uno de ellos la gestión de obra gruesa, terminaciones y/o instalaciones. A continuación se presentan los resultados obtenidos y se detallan los aspectos más importantes.

Caso de estudio 1: Estación Américo Vespucio - Línea 2 del Metro de Santiago

La duración planificada del proyecto fue 560 días y el costo presupuestado fue 16.9 millones de dólares. En este caso de estudio se implementaron los dos tipos de modelación multidimensional; para gestionar la obra gruesa se utilizó la modelación multidimensional basada en un modelo digital tridimensional y para gestionar las terminaciones se usó la modelación multidimensional basada en un modelo digital bidimensional. Esto último fue para mejorar la visualización de las terminaciones.

La modelación fue realizada por dos personas (1 dibujante CAD y 1 ingeniero joven) y fue supervisada por un ingeniero con experiencia en construcción y TI. La modelación duró 2 meses y fue continuamente actualizada durante la ejecución del proyecto.

Las dimensiones que se modelaron y utilizaron para gestionar la obra gruesa del proyecto fueron⁸: las tres primeras dimensiones que representaron al espacio (vista tridimensional del proyecto), el tiempo, la secuencia constructiva y estrategia de ejecución, la cubrición y cantidad, el costo y la seguridad.

⁸ La dimensión "historial de desempeño" no fue contemplada en el alcance del estudio pero sí es aplicable.

La Figura 1 muestra el alcance del proyecto en forma digital y tridimensional, y las ubicaciones de hormigón extraídas de cada uno de los elementos dibujados.

Las ubicaciones fueron exportadas al *software* de hoja de cálculo donde se hizo un trabajo de ordenamiento por actividades del proyecto y luego fueron cargadas, junto con los costos, en el *software* de planificación y control. Este *software* tuvo el potencial de filtrar y organizar eficazmente la información, y mostrar los histogramas de costos y cantidades a través del tiempo (Figura 2).

La dimensión “tiempo” fue modelada vinculando las fechas de inicio y término de las actividades del programa de construcción con los elementos del modelo digital 3D (se utilizaron los *software* de “visualización” y “base de datos”). Se pudo visualizar tridimensionalmente, a través de colores y texturas, el desarrollo de las actividades del proyecto a través del tiempo. Esta dimensión se utilizó, entre otras cosas, para realizar el seguimiento y control visual de avance del proyecto, tal como se muestra en la Figura 3.

Las dimensiones “secuencia constructiva y estrategia de ejecución” y “seguridad” fueron modeladas por defecto junto con la dimensión “tiempo”. Los beneficios obtenidos luego de utilizar la modelación multidimensional para la gestión de la obra gruesa del proyecto se resumen en la Tabla 1.

Las dimensiones que se modelaron y utilizaron para gestionar las terminaciones del proyecto fueron⁹: las dos primeras dimensiones que representaron a la superficie (vista en planta del proyecto), el tiempo, la secuencia constructiva y estrategia de ejecución, y el historial de desempeño de las actividades.

La Figura 4 muestra uno de los modelos bidimensionales elaborados para gestionar las terminaciones del proyecto. Los dibujos se realizaron utilizando el *software* de modelación y consistieron en plantas de los niveles del proyecto donde se pudieron diferenciar las actividades a través de colores. Las plantas de los recintos estuvieron subdivididas en colores según la cantidad de actividades realizadas en los ambientes respectivos.

Los modelos bidimensionales fueron vinculados a un programa de terminaciones y se utilizaron para visualizar el estado de avance del proyecto en diferentes instantes de tiempo. La figura 5 muestra en color gris las terminaciones ejecutadas y en códigos de color las actividades en ejecución. Se presentan los porcentajes reales de avance de las actividades junto a los códigos de color correspondientes. Estas figuras sirvieron, entre otras cosas, para realizar el seguimiento y control visual del proyecto.

Se imprimieron y pegaron las plantas a colores en diferentes partes de la obra con la intención de hacer transparente el desempeño del proyecto a cada uno de los participantes del mismo.

Los modelos se utilizaron también para determinar la cantidad de cuadrillas que trabajarían simultáneamente en un recinto. Esta información sirvió para analizar posibles interferencias durante el trabajo y encontrar soluciones con anticipación (Ej. cambio de estrategia de ejecución).

Además, los modelos permitieron realizar un seguimiento visual, en tiempo y espacio, del trabajo de cada una de las cuadrillas o subcontratistas. Si un subcontratista no tiene un flujo de trabajo continuo, los días que no trabaja retira sus recursos del proyecto y los asigna a otro; de esta forma, existe el peligro de que cuando el proyecto inicial requiera sus servicios, éstos no lleguen a tiempo (SACKS, 2004) y se produzca una inestabilidad en la obra (Ej. demoras y detenciones). Por esta razón, se utilizó el modelo como un mecanismo para reducir la discontinuidad de los trabajos.

La dimensión “historial de desempeño” fue modelada con el *software* de hoja de cálculo y consistió en un sistema de control “tradicional” automatizado, que proporcionó información descriptiva, porcentajes de avance e informes de causas de no cumplimiento de las actividades. Este tipo de control fue complementado con el control visual explicado anteriormente. La Figura 6 muestra la información correspondiente a una de las actividades del proyecto. Todas las actividades estuvieron codificadas (Ej. XXX-YY-ZZ) y sólo fue necesario cambiar el código para visualizar la información de otra actividad.

⁹ La dimensión “seguridad” no fue modelada porque sólo funciona junto a un modelo digital 3D. Las dimensiones “ubicación y cantidad” y “costo” no fueron contempladas en el alcance del estudio pero sí son aplicables.

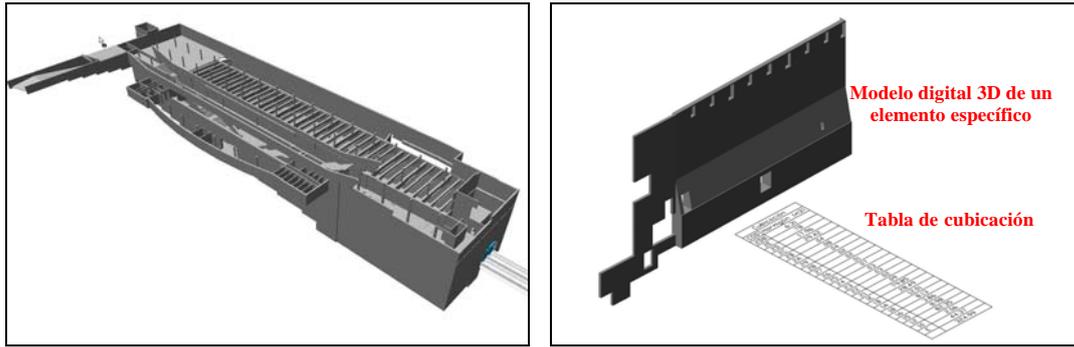


Figura 1 - Modelo digital 3D de la Estación Américo Vespucio y cubicaciones elaborados con el *software* de modelación y cubicación

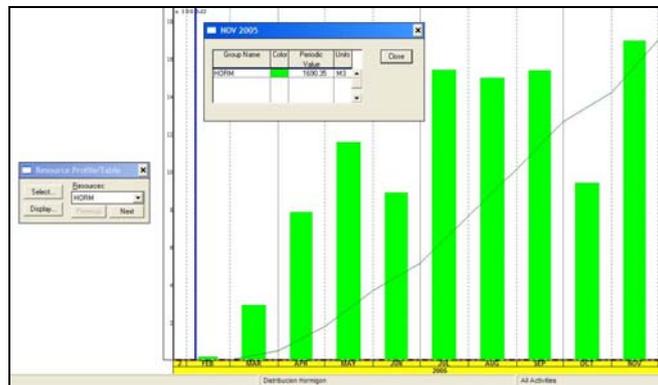


Figura 2 - Histograma de m³ de hormigón por mes



Figura 3 - Seguimiento y control visual de la obra gruesa (detección y solución de atrasos)

DIMENSIONES UTILIZADAS	CASO 1: ESTACIÓN DE METRO AMERICO VESPUCIO
	GESTIÓN DE LA OBRA GRUESA DEL PROYECTO
	Beneficios obtenidos
Espacio (3 primeras dimensiones)	Detección de 2 incongruencias en los planos del proyecto debido a interferencias.
	Aclaración de 2 detalles de unión entre elementos.
	Cambio de diseño para simplificar el proceso constructivo y para uniformizar la sección de las vigas prefabricadas. Se realizaron paseos virtuales a través del modelo 3D.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para construir detalles de unión complejos.
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión del alcance de obra y de los detalles constructivos complejos.
Tiempo (4ta Dimensión)	Mayor facilidad en la detección de elementos no planificados del proyecto. Éstos representaron alrededor de 389m ³ de hormigón armado (pérdida de 195000 dólares debido a que no fueron presupuestados y el proyecto fue a suma alzada.)
	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital. (Ej. duración de las actividades).
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de los estados de avance planificado y real de la obra utilizando la visualización digital 3D.
	Mayor grado de eficiencia para entender la información proveniente del seguimiento y control del proyecto. El ingeniero de planificación utilizó la visualización digital 3D para corroborar los porcentajes de avance calculados y para detectar los atrasos.
	Mayor nivel de la velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizados por los profesionales para analizar y determinar visualmente (en 3D) las actividades del proyecto que debieron ser ejecutadas.
Secuencia Constructiva y Estrategia de Ejecución (5ta Dimensión)	5 cambios realizados con anticipación en la secuencia constructiva del proyecto, a causa de incongruencias en los procedimientos constructivos.
	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital. (Ej. Secuencia constructiva)
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de los procedimientos constructivos utilizados en la obra.
	Mayor nivel de la velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para planificar y reprogramar las actividades del proyecto, ayudados por la visualización digital 3D.
Cubicación y Cantidad (6ta Dimensión)	Mayor nivel de precisión en las cubicaciones extraídas del modelo digital 3D. Se dejó de presupuestar 100m ³ (40385 dólares aprox.) por la imprecisión en las cubicaciones.
	Mayor grado de eficiencia en el manejo de las cantidades de obra de proyecto. El ingeniero de planificación contó, en forma rápida y confiable, con información filtrada y resumida de las cantidades de obra.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para subcontratar la ejecución de un sector de la obra, debido a que la capacidad de hormigonado existente era menor a la demandada en el mes.
Costo (7ma Dimensión)	Mayor grado de eficiencia en el manejo de los costos de obra del proyecto. El ingeniero de planificación contó, en forma rápida y confiable, con información filtrada y resumida de los costos del proyecto.
Seguridad (8va Dimensión)	Mayor nivel de predicción de las situaciones riesgosas en obra, reduciendo la probabilidad de accidentes y los costos asociados a ellos (paralizaciones y daños personales).
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por el prevencionista de riesgos para determinar las medidas preventivas del caso. El profesional utilizó la visualización digital 3D.

Tabla 1 -Beneficios obtenidos en la gestión de la obra gruesa del caso de estudio 1

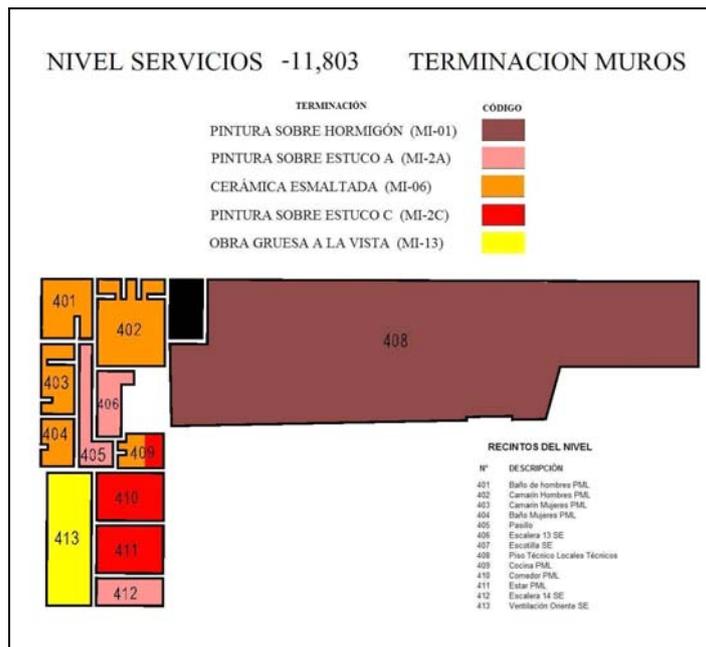


Figura 4 - Modelo digital bidimensional del nivel servicios del proyecto

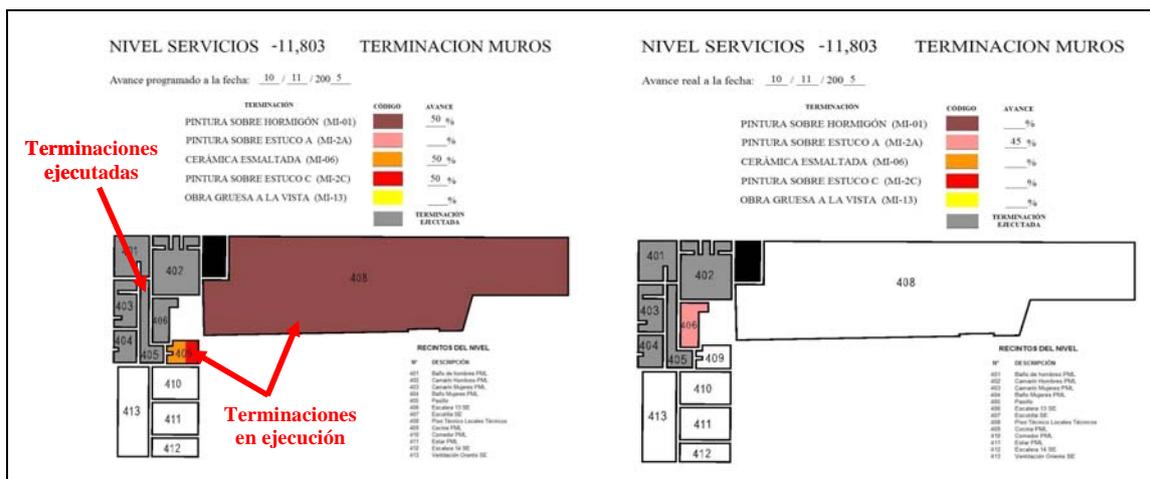


Figura 5 - Seguimiento y control visual de las terminaciones (detección y solución de atrasos)

Ingresar codigo de actividad de la forma XXX-YY-ZZ,
con:
XXX: N° del recinto (Ej. 107)
YY: Tipo de terminación (PI= piso, CI= cielo, MI= muro)
ZZ: Especificación del tipo de terminación (Ej. 2A, 01, etc.)

Control de Terminaciones				
Estación Vespucio				
Tipo de Actividad	Terminación Piso		Ubicación	Acceso Sur
Código	101-PI-2A		Recinto	Hall Acceso Sur oriente
Descripción	Baldosa microvibrada negro			
Contratista	0			
Cubicación	0			
Resumen de Control				
	Control	Fecha de control	% de Avance	Cumplimiento
	Nº 1	10/10/2005	10%	No
	Nº 2	15/10/2005	70%	SI
	Nº 3	00/01/1900	0%	SI
	Nº 4	00/01/1900	0%	SI
Programado				
	Fecha de inicio	22/07/2005	Duración	4 días
	Fecha de término	27/07/2005		
Real				
	Fecha de inicio	09/10/2005	Duración	8 días
	Fecha de término	17/10/2005		

Figura 6 - Historial de desempeño de la actividad 101-PI-2^a

Los beneficios obtenidos luego de utilizar la modelación multidimensional para la gestión de las terminaciones del proyecto se resumen en la Tabla 2.

Caso de estudio 2: Clínica Dávila

La duración planificada del proyecto fue 510 días y el costo presupuestado fue 16.5 millones de dólares. En este caso de estudio se implementó la modelación multidimensional basada en un modelo tridimensional. Las dimensiones que se modelaron y utilizaron para gestionar las instalaciones del proyecto fueron¹⁰: las tres primeras dimensiones que representaron al espacio (vista tridimensional del proyecto).

La modelación fue realizada por tres personas (2 dibujantes CAD y 1 ingeniero joven) y fue supervisada por un ingeniero con experiencia en construcción y TI. La modelación duró 1 mes y fue continuamente actualizada durante la ejecución del proyecto.

La Figura 7 muestra algunas de las interferencias encontradas entre las instalaciones del proyecto, detectadas por análisis visual, utilizando paseos virtuales a través del modelo digital 3D, elaborado a partir de los planos de diseño.

Los beneficios obtenidos luego de utilizar la modelación multidimensional para la gestión de las instalaciones del proyecto se resumen en la Tabla 3.

Caso de estudio 3: Condominio San Pablo - Primera etapa

La duración planificada del proyecto fue 240 días y el costo presupuestado fue 1.3 millones de dólares. En este caso de estudio se implementó la modelación multidimensional basada en un modelo tridimensional.

La modelación fue realizada por un ingeniero con experiencia en construcción y TI. La modelación duró 3 días y fue continuamente actualizada durante la ejecución del proyecto. Las dimensiones que se modelaron y utilizaron para gestionar la obra gruesa del proyecto fueron¹¹: las tres primeras dimensiones que representaron al espacio (vista tridimensional del proyecto), el tiempo, la secuencia constructiva y estrategia de ejecución, y la cubicación y cantidad. La Figura 8 muestra un avance del proyecto en forma tridimensional.

Los beneficios obtenidos luego de utilizar la modelación multidimensional para la gestión de la obra gruesa del proyecto se resumen en la Tabla 4.

¹⁰ Las demás dimensiones no fueron contempladas en el alcance del estudio pero sí son aplicables.

¹¹ Las demás dimensiones no fueron contempladas en el alcance del estudio pero sí son aplicables.

DIMENSIONES UTILIZADAS	CASO 1: ESTACIÓN DE METRO AMERICO VESPUCIO
	GESTIÓN DE LAS TERMINACIONES DEL PROYECTO
	Beneficios obtenidos
Superficie (2 Primeras Dimensiones)	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de la ubicación en planta de las diversas terminaciones del proyecto.
Tiempo (4ta Dimensión)	Mayor facilidad en la detección de terminaciones no planificadas del proyecto. Se detectó una terminación no planificada en el proyecto.
	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital (Ej. Duración de las actividades).
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de los estados de avance planificado y real de las terminaciones utilizando la visualización digital 2D.
	Mayor grado de eficiencia para entender la información proveniente del seguimiento y control del proyecto. El ingeniero de planificación utilizó la visualización digital 2D para corroborar los porcentajes de avance calculados y para detectar los atrasos.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones: utilizado por los profesionales para analizar y determinar visualmente (en 2D) las actividades de terminaciones que debieron ser ejecutadas.
Secuencia Constructiva y Estrategia de Ejecución (5ta Dimensión)	7 cambios realizados con anticipación en la estrategia de ejecución del proyecto, a causa de incongruencias en el orden cronológico que fue planificada la ejecución de algunas terminaciones del proyecto.
	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital (Ej. estrategia de ejecución).
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de las estrategias de ejecución utilizadas en la obra.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para planificar y reprogramar las actividades del proyecto, ayudados por la visualización 2D.
Historial de Desempeño (9na Dimensión)	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en la base de datos del sistema fue actualizado automáticamente en el historial de desempeño de la actividad correspondiente.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para reducir o evitar que se repitan las causas de no cumplimiento de las actividades.

Tabla 2 - Beneficios obtenidos en la gestión de las terminaciones del caso de estudio 1

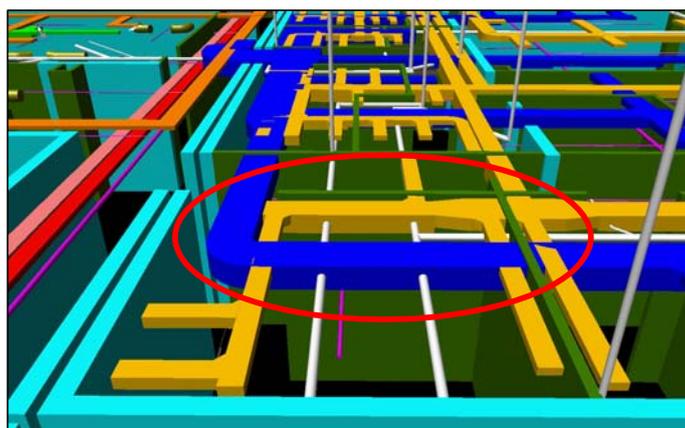


Figura 7 - Interferencias entre Instalaciones del proyecto

DIMENSIONES UTILIZADAS	CASO 2: CLÍNICA DÁVILA
	GESTIÓN DE LAS INSTALACIONES DEL PROYECTO
	Beneficios obtenidos
Espacio (3 Primeras Dimensiones)	Detección de 287 incongruencias en los planos del proyecto debido a las interferencias entre instalaciones. El uso del modelo digital 3D representó un ahorro de 32100 dólares en el costo de producción (ahorro en trabajos rehechos) y una reducción de 20 días en la duración de la obra (ahorro en gastos generales). El análisis fue realizado por el ingeniero de terreno con cifras reales de costo y duración.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones; utilizado por los profesionales para solucionar eficazmente las interferencias detectadas a partir del modelo digital 3D.
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión del alcance de obra y de las soluciones que el profesional determinó para las interferencias encontradas.

Tabla 3 - Beneficios obtenidos en la gestión de las instalaciones del caso de estudio 2

DIMENSIONES UTILIZADAS	CASO 3: CONDOMINIO SAN PABLO – PRIMERA ETAPA
	GESTIÓN DE LA OBRA GRUESA DEL PROYECTO
	Beneficios obtenidos
Espacio (3 Primeras Dimensiones)	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión del alcance de obra.
Tiempo (4ta Dimensión)	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital (Ej. Duraciones de las actividades).
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de los estados de avance planificado y real de la obra utilizando la visualización digital 3D.
	Mayor grado de eficiencia para entender la información proveniente del seguimiento y control del proyecto. El ingeniero de planificación utilizó la visualización digital 3D para corroborar el avance típico diario.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones, utilizado por los profesionales para analizar y determinar visualmente (en 3D) las actividades del proyecto que debieron ser ejecutadas.
Secuencia Constructiva y Estrategia de Ejecución (5ta Dimensión)	Mayor nivel de automatización en el proceso de actualización de información. Cualquier cambio realizado en el programa de construcción fue actualizado automáticamente en el modelo digital (Ej. Secuencia constructiva).
	Mayor grado de eficiencia en la comunicación y entendimiento entre los diversos participantes del proyecto, durante el proceso de transmisión de los procedimientos constructivos utilizados en la obra.
	Mayor nivel de velocidad y calidad en el proceso de toma de decisiones, utilizado por los profesionales para planificar y reprogramar las actividades del proyecto, ayudados por la visualización digital 3D.
Cubicación y Cantidad (6ta Dimensión)	Gran nivel de precisión en las cubitaciones extraídas del modelo digital 3D. Hubo alrededor de 0,5% de diferencia con los valores obtenidos de la forma tradicional. Los reportes de avance fueron proporcionados al administrador del proyecto; sin embargo, no lo utilizó como se esperaba porque confiaba más en la información proveniente de su método de trabajo.

Tabla 4 - Beneficios obtenidos en la gestión de la obra gruesa del caso de estudio 3

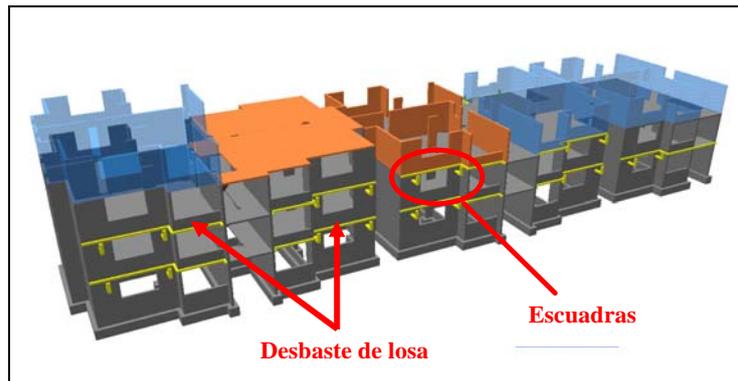


Figura 8 - Avance de la obra gruesa del proyecto

El Impacto de la TI en los casos de estudio desde el enfoque *Lean Construction*

La modelación multidimensional funciona como un *buffer* de información y conocimiento¹², representado digital y visualmente, que se utiliza para simplificar y hacer más transparente los procesos de planificación, control y coordinación. Las mejoras se vieron reflejadas en los siguientes aspectos:

- (a) Incremento de la disponibilidad, consistencia, facilidad de acceso y confiabilidad de la información del proyecto;
- (b) Reducción de variabilidad e incertidumbre respecto al alcance y desempeño del proyecto durante su ejecución;
- (c) Reducción de tiempos de ciclo: aumento de la velocidad y calidad del proceso de toma de decisiones; y
- (d) Mayor transparencia y generación de valor: mejora del entendimiento y la comunicación entre los participantes del proyecto.

Estos aspectos se ven reflejados en indicadores de desempeño medidos durante la utilización de la modelación multidimensional en los casos de estudio.

Conclusiones

Esta investigación demostró que se pueden obtener beneficios importantes, al utilizar este tipo de

¹² Un *buffer* de información y conocimiento es un repositorio digital de diversa información del proyecto y de algunos conocimientos que los profesionales tienen respecto al mismo, que está disponible eficazmente para su uso. El *buffer* en todo su concepto es utilizado como un mecanismo de defensa contra la variabilidad de los procesos, es por esto, que si se cuenta con este tipo de *buffer* se evitan en muchas ocasiones tiempos muertos por falta de información fidedigna y oportuna.

modelos, en proyectos de mediana y pequeña envergadura y en un país en desarrollo.

La investigación presentó un nuevo enfoque de modelación multidimensional hasta ahora no investigada ni utilizada en el mundo: la modelación multidimensional basada en un modelo bidimensional. Este tipo de modelación ayudó a los profesionales a detectar incongruencias en la planificación y a simplificar el trabajo de control de las terminaciones usando una visualización en planta de las actividades realizadas.

Según la percepción de los profesionales entrevistados, el uso de la modelación multidimensional simplificó e hizo más transparente los procesos de planificación, control y coordinación de los proyectos en estudio durante su ejecución. Esto se reflejó en el incremento de la disponibilidad, consistencia, facilidad de acceso y confiabilidad de la información del proyecto, en la reducción de la incertidumbre que tuvieron los profesionales y trabajadores en general respecto al alcance y desempeño del proyecto, en el aumento de la velocidad y calidad del proceso de toma de decisiones, y en la mejora del entendimiento y la comunicación entre los participantes del proyecto.

La reducción de la complejidad e incertidumbre del proyecto produjo una merma en la variabilidad de los procesos de construcción y contribuyó a atenuar o eliminar algunas pérdidas tales como demoras por falta de información clara y precisa, detenciones por situaciones inseguras y/o accidentes, interferencias en el trabajo y trabajos rehechos. La investigación tuvo como marco teórico a *Lean Construction*, ya que ésta y la modelación multidimensional buscan reducir o eliminar las pérdidas en los procesos. De esta manera, el análisis y las conclusiones tienen una base teórica que ayuda a entender mejor los impactos de las implementaciones de TI.

Durante la implementación de la modelación multidimensional existieron dificultades de diversa índole que de no existir hubiera producido mayor cantidad de mejoras en los proyectos en estudio. Hubo problemas organizacionales (Ej. las empresas no contaban con una política establecida de apoyo a la innovación tecnológica, en algunos casos hubo dificultad para transmitir los resultados de la investigación a la gerencia general y recibir su retroalimentación), problemas culturales (Ej. resistencia al cambio de algunos profesionales), problemas de factor humano (Ej. la exigencia y presión del trabajo no permitió a los profesionales participar en la medida como ellos hubieran deseado) y problemas técnicos (Ej. no hubo disponibilidad de algunos software en obra, hubo desconocimiento de los profesionales sobre el uso de algunos software).

La implementación ideal de la modelación multidimensional es durante la etapa de diseño; sin embargo, se demostró que la implementación tardía (durante la etapa de ejecución) aún proporciona una cantidad no despreciable de beneficios que debieran motivar a los otros participantes del proyecto, sobretodo al mandante, a utilizar este tipo de modelación en etapas iniciales del proyecto.

Se recomienda desarrollar una metodología para la implementación de la modelación multidimensional en proyectos de construcción, investigar nuevos software para modelar otras dimensiones importantes (Ej. recursos, calidad, espacio de trabajo, etc.) y aplicar este tipo de modelación a otros sectores de la industria de la construcción (Ej. carreteras, obras industriales, obras civiles, etc.).

Referencias

BALLARD, G. **Lean Project Delivery System**. White Paper 8, *Lean Construction Institute*, 2000.

BERTELSEN, S. **The mouse's opinion on the building design documents**. NIRAS Consulting Engineers and Planners, Dinamarca, 1992

EASTMAN C.; SACKS R.; LEE, G. Strategies for Realizing the Benefits of 3D Integrated Modeling of Buildings for the AEC Industry. NIST SP 989,. In: International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 19., (ISARC), **Proceedings...** NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, Gaithersburg-Maryland, EEUU. 2002

FISCHER M.; KUNZ, J. **The Scope and Role of Information Technology in Construction**. Centre for Integrated Facility Engineering, Stanford University, EEUU, 2004

IZAGUIRRE, L. **Proposición de la Modelación Multidimensional como un Mecanismo de Mejora para la Gestión de Proyectos de Construcción**. Tesis (Magíster en Ciencias de la Ingeniería) - Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 2006

KOSKELA, L. **An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction**. Dissertation (VTT Building Technology) - Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2000

KHANZODE A., FISCHER M., REED D. Case Study of the Implementation of the *Lean Project Delivery System* Using Virtual Building Technologies on a Large Healthcare Project. In: IGLC, 13, 2005. **Proceedings...** Sydney, Australia: IGLC: 2005

LICHTIG, W. A. The Integrated Agreement for Lean Project Delivery. **The Construction Lawyer**, v. 26, n. 3, 2006.

RISCHMOLLER, L.; ALARCON, L. F.; KOSKELA L. Improving Value Generation in the Design Process of Industrial Projects Using CAVT. **Journal of Management in Engineering**, v. 22, n. 2, p. 52-60, april, 2006.

RISCHMOLLER L.; ALARCÓN, L. Using Lean Principles as a Framework to Study Information Technology in Construction. In: IGLC, 13, 2005. **Proceedings...** Sydney, Australia: IGLC: 2005

SACKS R. Towards a Lean Understanding of Resource Allocation in a Multi-Project Sub-Contracting Environment. In: IGLC, 12, 2004. **Proceedings...** Dinamarca: IGLC: 2004.

SCRI. Salford Centre for Research and Innovation. Developing a Vision of nD-Enabled Construction. Construct I.T. Centre of Excellence The National Network for the UK, Inglaterra, 2003.

STANFORD University. **Cife Publications List**. 2008. Disponible en: <<http://cife.stanford.edu/Publications/index.html>>. Acceso en: 01 oct. 2008.

Reconocimientos

Este trabajo de investigación no hubiera sido posible sin la ayuda del Centro de Excelencia en Gestión de Producción (GEPUC) y algunas empresas constructoras del medio chileno que vienen trabajando con GEPUC en temas relacionados a gestión. A ellos nuestros más sinceros agradecimientos.