

Uso de VSM y Simulación para mejorar la productividad laboral en la construcción de vivienda

José A. González-Fajardo*, Roberto Kú-Chacón, Gilberto Corona-Suárez, Sergio Álvarez-Romero

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Avenida de Industrias No Contaminantes y Periférico Norte s/n. Mérida, Yucatán, México.

Fecha de recepción: 15 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 25 de agosto de 2025

Resumen

En los proyectos de construcción de vivienda en Yucatán, es frecuente observar retrasos en el cumplimiento de los tiempos establecidos, así como sobrecostos. Los recursos humanos representan uno de los factores más críticos que afectan tanto la entrega oportuna como los costos totales del proyecto. Por lo tanto, analizar la productividad laboral y los factores que la influyen es esencial para mejorar el desempeño.

Este estudio tiene como objetivo proponer mejoras en la productividad laboral mediante la aplicación de los principios de la filosofía *lean construction* en la construcción tradicional en serie de vivienda en Mérida, Yucatán. En los últimos años, esta metodología ha sido adoptada cada vez más en la industria de la construcción, con numerosos casos exitosos de mejora de la productividad. Dentro de este enfoque, el mapeo del flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés) es una herramienta clave que permite identificar tareas que agregan valor y aquellas que no.

Entre los principales logros de este estudio se encuentran: la observación y documentación de los procesos constructivos en campo y su productividad real; el mapeo de estos procesos mediante VSM; la clasificación de las tareas según su aporte de valor; el desarrollo de un modelo de simulación para evaluar las mejoras propuestas; el rediseño de flujos de proceso orientado a eliminar desperdicios y aumentar la productividad; y la evaluación de dichos flujos mediante simulación de eventos discretos para cuantificar su efectividad. Los resultados de la simulación mostraron mejoras en los tiempos de entre 18 % y 24 % con la composición original de cuadrillas, y entre 21 % y 38 % al modificar dicha composición.

Palabras clave: Productividad de la mano de obra, *Lean Construction*, Mapas de flujo de valor, Simulación de eventos discretos, Mejora de la productividad

*antonio.gonzalez@correo.uady.mx

Application of VSM and Simulation to Enhance Labor Productivity in Housing Construction

Abstract

In housing construction projects in Yucatán, delays in meeting scheduled completion times are frequently observed. Human resources are among the most critical factors affecting both timely delivery and overall project costs. Therefore, analyzing labor productivity and the factors influencing it is essential for improving performance.

This study aims to propose enhancements to labor productivity by applying lean construction principles to traditional serial housing construction in Mérida, Yucatán. In recent years, lean construction has been increasingly adopted in the construction industry, yielding numerous successful cases of productivity improvement. Within this framework, value stream mapping (VSM) is a key tool used to identify tasks that add value and those that do not.

The main accomplishments of this study include: observing and documenting on-site construction processes and their actual productivity; mapping these processes using VSM; classifying tasks according to their value contribution; developing a simulation model to evaluate proposed improvements; redesigning process flows to eliminate waste and enhance productivity; and assessing these new flows through discrete event simulation to quantitatively measure their effectiveness. The simulation results showed time improvements ranging from 18% to 24% using the original crew composition, and from 21% to 38% when crew composition was modified.

Keywords: Labor productivity, Lean construction, Value Stream Mapping, Discrete event simulation, Productivity improvement

Introducción

En los proyectos de construcción de vivienda en el estado de Yucatán, la mano de obra representa el recurso más importante, ya que sin él es imposible llevar a cabo las actividades constructivas (Arboleda, 2014). El rendimiento de los trabajadores incide directamente en la entrega en tiempo y forma de la obra (Serpell & Peralta, 1991). La productividad laboral, entendida como el valor inverso del rendimiento, implica tanto la eficiencia en el uso de recursos como la calidad del producto entregado (Serpell, 1993). Sin embargo, se ha identificado que la baja productividad en este sector permanece como una de las principales causas de retrasos y sobrecostos, especialmente en regiones donde los sistemas constructivos

industrializados y la mecanización aún son limitados, como es el caso de Yucatán.

Si bien la productividad, el costo y la duración de una obra dependen en buena medida de sus administradores, la ejecución en campo está directamente ligada al desempeño de capataces y trabajadores. En muchos casos, los aumentos en los costos y los retrasos se atribuyen a una fuerza laboral poco eficiente (Serpell & Peralta, 1991). Uno de los factores que más incide en esta pérdida de eficiencia es la interrupción del trabajo o disruption, definida como la pérdida de productividad, perturbación o impedimento en los métodos normales de trabajo del contratista (Nelson, 2011). Estas interrupciones pueden deberse a retrabajos, errores de diseño, escasez de recursos financieros, mano de obra no calificada, entre

otros factores, y tienen como efecto común el retraso en los tiempos de entrega (Yang et al., 2014), así como posibles sanciones o incrementos en los costos de ejecución (Schwartzkopf, 2004).

Ante este tipo de pérdidas de eficiencia, surge la necesidad de emplear herramientas modernas que permitan detectar, analizar y reducir desperdicios en los procesos constructivos. Una de las más útiles para estos fines es el Value Stream Mapping (VSM), o mapeo de flujo de valor, una herramienta derivada de la filosofía *lean construction* (Koskela, 1992), originada en la industria automotriz (Pons Achell, 2014). El VSM utiliza símbolos estandarizados para representar procesos de trabajo y flujos de información, permitiendo identificar actividades que no agregan valor y proponer mejoras orientadas a aumentar la eficiencia (Hines & Rich, 1997).

Para aplicar VSM en campo, es necesario conocer el estado actual de los procesos y las condiciones que los afectan. Esto se logra mediante observación directa del trabajo realizado por una cuadrilla, unidad básica para el análisis de la productividad de la mano de obra (Baeza et al., 2003). Para este fin, se emplean herramientas simples como cronómetro, cinta de medir y una cédula de observación. Diversos autores como Pino (2002) y Arcudia et al. (2003) han desarrollado formatos para el registro sistemático de actividades y su clasificación según el valor que aportan al producto final. En este estudio, se utilizó una cédula de este tipo para registrar la productividad real de los trabajadores en condiciones reales de obra.

Además del análisis visual mediante VSM, otra herramienta poderosa para planificar y evaluar mejoras en procesos constructivos es la simulación (Dozzi & AbouRizk, 1993). Esta técnica permite modelar el comportamiento de sistemas reales o hipotéticos bajo diferentes condiciones (Guasch et al., 2003). En

particular, la industria de la construcción se ha beneficiado del uso de modelos de simulación de eventos discretos (DES), que representan los cambios en puntos específicos del tiempo (Hassan & Gruber, 2008). Simuladores como CYCLONE (Halpin, 1977), STROBOSCOPE y *Simphony* (Hajjar & AbouRizk, 1999) han demostrado ser eficaces en la representación de procesos constructivos complejos. *Simphony*, en particular, permite el desarrollo de modelos detallados que reflejan fielmente las operaciones en obra y facilitan la evaluación de escenarios de mejora.

El objetivo de este estudio es analizar y proponer mejoras en la productividad de la mano de obra en proyectos de vivienda tradicional en serie, en Mérida, Yucatán. Para ello, se realizaron observaciones de campo, mapeo de procesos mediante VSM, clasificación de actividades según su valor agregado, y la elaboración de un modelo de simulación con *Simphony.NET*. A partir de estos análisis, se evaluaron diferentes propuestas de mejora orientadas a optimizar la eficiencia laboral y reducir los tiempos de ejecución en obra.

Metodología

En este trabajo se investigaron diversos factores que afectan la productividad de la mano de obra, con base en el principio de *lean construction* enfocado en la “eliminación de desperdicios”, es decir, aquellas actividades que no agregan valor al producto final. A partir de una amplia observación y recolección de datos en campo sobre los procedimientos constructivos actuales, y con el apoyo de la herramienta Value Stream Mapping (VSM), se visualizaron las distintas tareas que conforman las actividades de construcción, identificando aquellas que no aportan valor.

Con esta información, fue posible proponer mejoras y evaluar su eficacia mediante el modelado y la simulación de eventos discretos. En la Figura 1 se muestra el proceso

metodológico completo. La investigación de campo se realizó en una empresa constructora de viviendas de interés social, donde se

estudiaron cuatro viviendas de dos niveles, con una superficie de 73 m² cada una, en proceso de construcción.

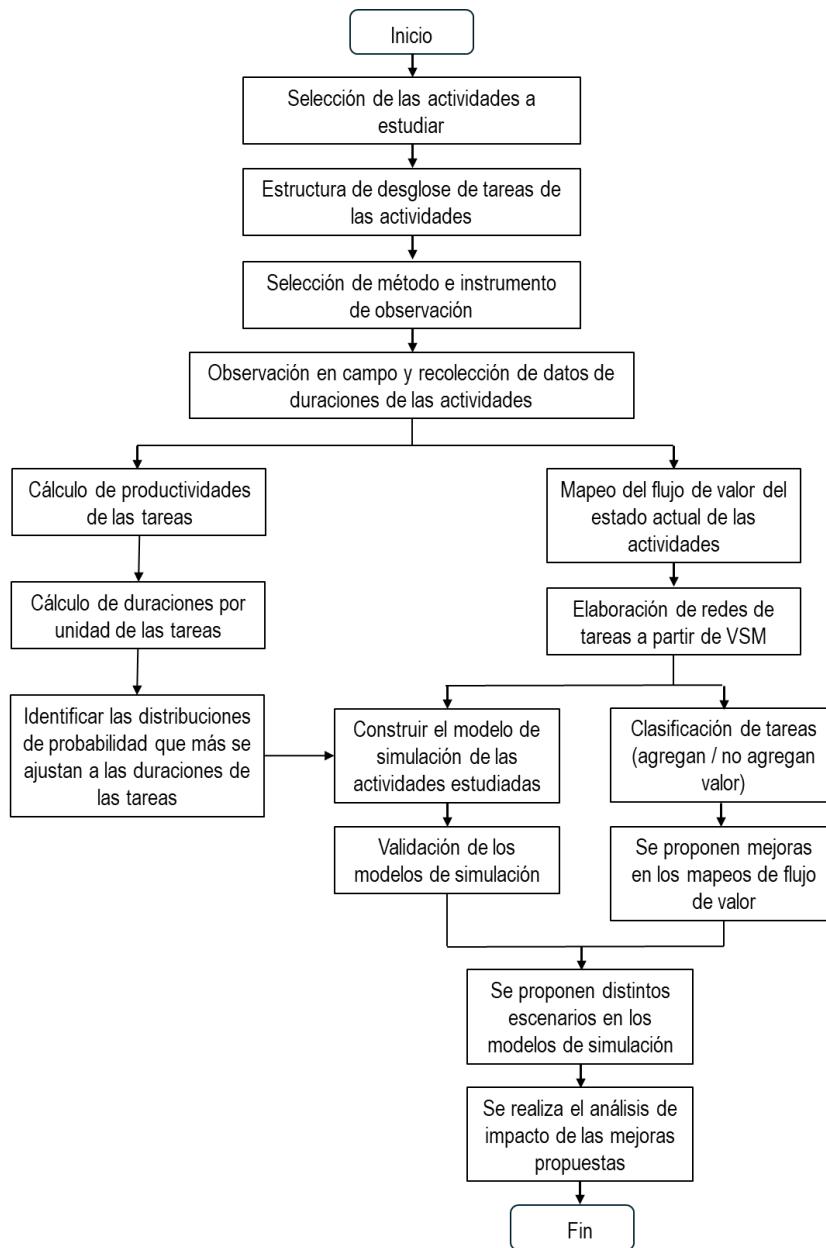


Figura 1. Esquema metodológico.

Selección de las actividades. Se seleccionaron actividades considerando, como principal factor de decisión, aquellas que requieren más tiempo para finalizar su proceso de

construcción en el proyecto. Estas actividades fueron cuatro, Muros y techos en planta baja y planta alta (niveles 1 y 2), que representan el 60% de la duración de la obra negra (primera

etapa) en proyectos de construcción de vivienda. Los Muros fueron block de 15x20x40 cm de concreto vibrocomprimido, pegados con mezcla de arena, cal y cemento; se incluyó la construcción de sus cadenas, castillos y cerramientos de concreto armado. Los techos fueron de vigueta pretensada 12-5 y bovedilla de concreto vibrocomprimido de 15x25x56 cm, con una capa de compresión de concreto de 5 cm; se incluyó las trabes de concreto según el plano.

Estructura de desglose de las actividades. En este paso se identificaron que tareas componen cada una de las dos actividades, con el fin de describirlas y facilitar la recolección de datos. Para definir las tareas que componen las actividades, se observó directamente en obra el proceso constructivo. En la Tabla 1 se muestra los procesos y tareas identificados.

Tabla 1. Desglose de las actividades estudiadas.

Actividad: Muros de block de 15x20x40		Actividad: Techos de concreto con losa de vigueta y bovedilla	
Procesos	Tareas	Procesos	Tareas
Construcción de Muros de block	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Preparación de mortero en sitio • Acarreo de mezcla • Pegado de bloques (plomado) 	Construcción de trabes	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Armado de acero • Preparación de cimbra • Colocación de acero • Elaboración de concreto • Acarreo de concreto • Colado de concreto (vibrado) • Descimbrado • Armado de andamios
Construcción de castillos armados y castillos ahogados. (considerando el anclaje de acero o armex)	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Armado de cimbra para el castillo • Elaboración de concreto en obra • Acarreo de concreto • Colado de castillos (vibrado) • Descimbrado 	Construcción de losa de azotea	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Colocación de vigueta y bovedilla • Colocación de puntales • Elaboración de cimbrado perimetral • Colocación de instalaciones eléctricas • Colocación de malla electrosoldada • Colado de losa de concreto (premezclado) • Descimbrado
Construcción de cerramientos	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Armado de acero • Preparación de cimbra • Colocación de acero • Elaboración de concreto • Acarreo de concreto • Colado de concreto (vibrado) • Descimbrado 		
Construcción de cadena de nivelación	<ul style="list-style-type: none"> • Acarreo de materiales y herramientas • Preparación de cimbra • Elaboración de concreto • Acarreo de concreto • Colado de concreto (vibrado) • Descimbrado • Armado de andamios 		

Diseño del instrumento y observación en campo. Se diseñó un instrumento de recolección de datos basado en el desglose de tareas, con el objetivo de facilitar la observación sistemática en campo. Este instrumento permitió registrar las siguientes variables: actividades realizadas y otras observadas, tareas que no agregan valor, tiempos de ejecución (hora de inicio y de finalización), volumen ejecutado, integrante de la cuadrilla que ejecutó cada tarea, distancias de acarreo de materiales y cualquier otra observación relevante.

El instrumento fue utilizado durante visitas a obra, en las cuales se observaron y registraron datos de los procesos constructivos. Las observaciones se llevaron a cabo durante 57 días hábiles, abarcando el inicio y la terminación de actividades relacionadas con la construcción de muros y techos. El muestreo se realizó diariamente, identificando a los integrantes de las cuadrillas y registrando las tareas ejecutadas por cada trabajador, así como los tiempos de ejecución, tiempos de espera y desperdicios. La recopilación de una gran cantidad de datos fue fundamental para asegurar un alto nivel de confianza en los análisis posteriores.

Como resultado de esta etapa, se documentaron dos procedimientos constructivos: uno con una duración de 24 días y otro de 33 días. Se seleccionó este último para el desarrollo de los modelos, debido a que presentó condiciones contextuales más favorables, tales como una mayor estabilidad en la composición de las cuadrillas, menor número de suspensiones de actividades y mejor calidad observada en los productos obtenidos.

Mapeo del estado actual. Se elaboró un mapeo de flujo de valor (VSM) del proceso constructivo seleccionado. El objetivo principal de este mapeo fue analizar e identificar con mayor claridad aquellas tareas que generan tiempos muertos, demoras y retrasos dentro de la cadena de valor.

Para la clasificación de las tareas observadas durante la ejecución, se consideraron los tres tipos definidos en la literatura (Monden, 1993): a) tareas sin valor agregado (NVA), b) tareas necesarias, pero sin valor agregado (NNVA), y c) tareas con valor agregado (VA).

Las tareas con valor agregado se refieren a aquellas por las que un cliente estaría dispuesto a pagar (Rojas & González, 2017). Por el contrario, una actividad que no aumente el valor del producto o que no esté incluida en el precio percibido por el cliente representa un costo adicional para el proyecto. Estas tareas se consideran desperdicio tipo II (sin valor agregado) y deben ser eliminadas del flujo de valor. De acuerdo con Rojas & González (2017), existen también tareas clasificadas como desperdicio tipo I que, si bien no agregan valor, son necesarias para completar el proyecto en tiempo y forma. Estas últimas pueden ser objeto de mejora para aumentar la productividad de los procesos.

Durante el análisis se identificaron numerosas tareas consideradas como desperdicio, principalmente debido a la persistencia de métodos constructivos “tradicionales” en los trabajos de albañilería. Para diferenciar las tareas que agregan valor de aquellas que no lo hacen, fue necesario identificar los tipos de desperdicio comúnmente reconocidos en la literatura (Pons Achell, 2014), tales como: sobreproducción, esperas o tiempos de inactividad, transporte innecesario, sobreprocesamiento, exceso de inventario, movimientos innecesarios y defectos de calidad (retrabajos). A estos se suman otros factores como el uso inadecuado de herramientas y la conformación ineficiente de las cuadrillas de trabajo.

Se desarrollaron cuatro mapeos de flujo de valor, correspondientes a las siguientes actividades constructivas: a) muros de primer nivel, b) techo de primer nivel, c) muros de segundo nivel, y d) techo de segundo nivel.

Para su elaboración, primero se representaron todas las tareas que componen cada actividad mediante un diagrama VSM, una vez recopilada la información completa en campo. En cada tarea se registraron su duración, el número de personas involucradas y la cantidad de producción obtenida. Posteriormente, se identificaron y marcaron con un triángulo las actividades que no agregaban valor (esperas o tareas improductivas), indicando sus respectivas duraciones y frecuencias. Finalmente, se anotaron las duraciones sobre cada tarea en los mapas, con el fin de calcular

el tiempo total requerido para ejecutar cada procedimiento constructivo.

En la Figura 2 se presenta como ejemplo el diagrama VSM correspondiente al proceso de construcción del techo del primer nivel. Esta figura se incluye con fines ilustrativos, ya que su tamaño impide su legibilidad. Para facilitar el análisis detallado de los procedimientos, los diagramas fueron representados de forma “lineal”, es decir, se desglosaron las actividades sin considerar traslapes entre tareas; se asumió que cada tarea inicia una vez que la anterior ha concluido por completo.

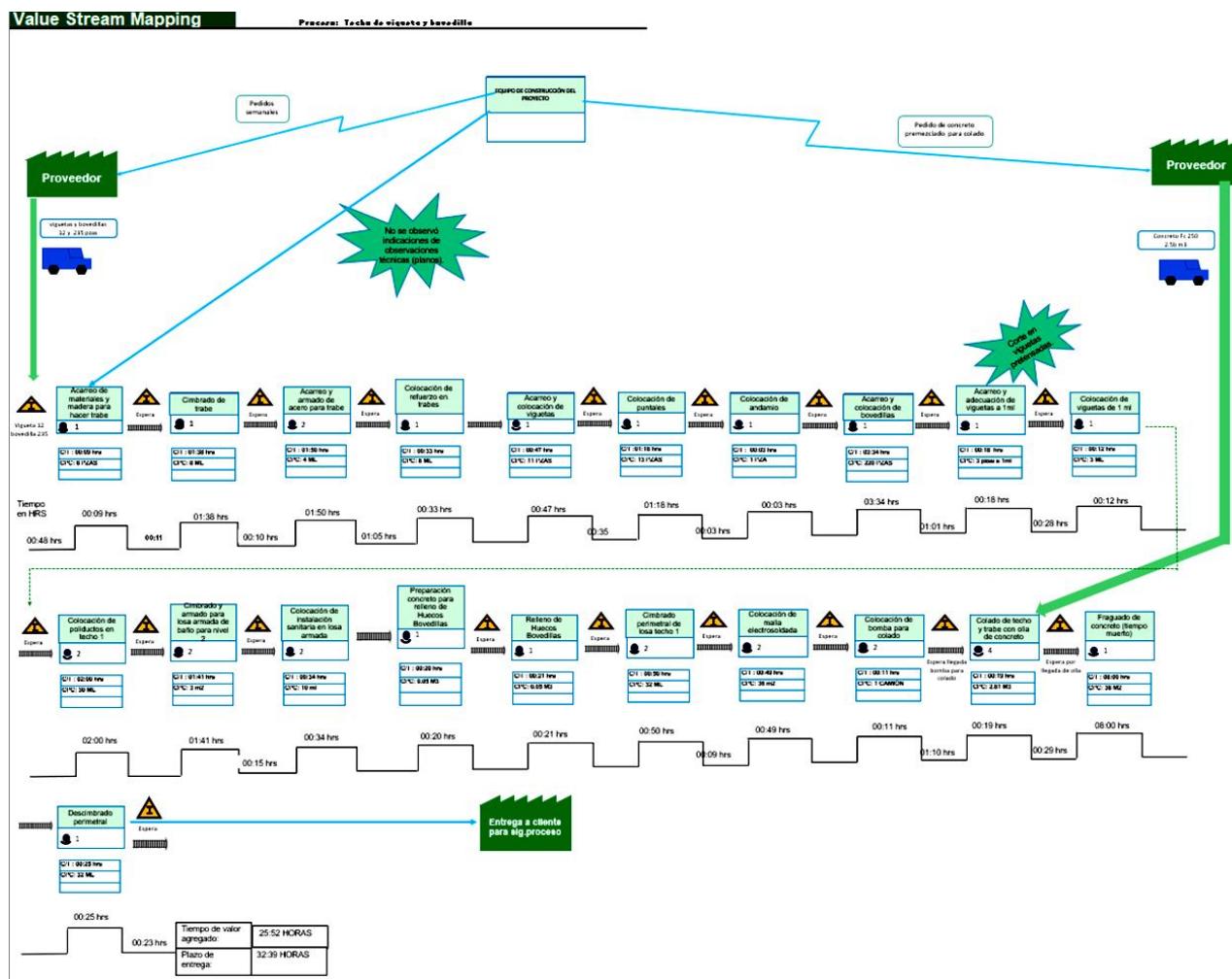


Figura 2. VSM actual de la actividad Techo nivel 1.

Con base en el análisis de los diagramas VSM, se procedió a clasificar la lista general de tareas en tres categorías: tareas que agregan valor, tareas que no agregan valor y tareas que, aunque no agregan valor, son indispensables para complementar el proceso. En la Tabla 2 se

muestra la clasificación final de las tareas que conforman cada actividad constructiva. Esta clasificación resulta fundamental para realizar modificaciones y mejoras al mapeo del flujo de valor de la situación actual (VSM actual).

Tabla 2. Clasificación de las tareas mediante el uso de VSM.

AGREGAN VALOR	NO AGREGAN VALOR, PERO SON NECESARIOS	NO AGREGAN VALOR
<ul style="list-style-type: none"> • Pegado de bloques • Colocación de malla electrosoldada • Colado de techo • Colocación de instalaciones eléctricas • Colocación de instalaciones sanitarias y eléctricas • Colocación de vigueta • Colado de castillo • Colocación de bovedilla • Colado de trabe • Colocación de armex • Colado de cerramiento • Colocación de acero de trabe • Colado de cadena de nivelación • Armado de acero de trabe • Cimbrado de castillo 	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de escuadra • Armado y desarmado de andamios • Descimbrado de castillos • Descimbrado de cerramiento • Descimbrado de cadena de nivelación • Descimbrado de trabe • Colocación de puntales • Relleno de huecos en bloques • Relleno de huecos en bovedillas • Descimbrado perimetral • Cimbrado de trabe • Cimbrado perimetral • Acarreo mortero • Preparación de mortero • Preparación de concreto • Cimbrado de cerramiento • Cimbrado cadena de nivelación • Espera necesaria por colados en serie • Acarreo de concreto • Acarreo de bloques • Acarreo material para preparación mortero • Acarreo de materiales para hacer cimbra de trabe • Acarreo material para cimbrado de castillos • Acarreo material para preparación concreto • Acarreo de materiales para cimbrado de cadena de nivelación • Acarreo de materiales para cimbrado de cerramiento • Acarreo de viguetas • Acarreo de bovedillas 	<ul style="list-style-type: none"> • Espera (descanso prolongado) • Espera (acarreo de materiales ajenos a casa) • Espera por movimientos innecesarios, por cargar camiones • Espera para colocación de instalación sanitaria e hidráulica • Espera por descarga de camiones de material (movimientos Innecesarios). • Espera acarreo de tubulares (movimientos Innecesarios). • Espera por desayunar (demora) • Descarga de viguetas. • Espera por llegada de concreto • Espera por llegado y acomodo de bomba • Demolición de muro por falta de instrucción • Pegado de bloques sobre nivel de ventana • Espera para colocación de instalación eléctrica • Espera correcciones en tramo

Red de tareas para la simulación. Para realizar las simulaciones, es necesario modelar los traslapes reales entre las tareas, de acuerdo con los procedimientos observados. Con

diagramas dibujados de forma “lineal”, el tiempo de terminación de las actividades se incrementa y no coincide con lo observado; sin embargo, es indispensable que los resultados

de un modelo de simulación no difieren en más de un 20% con lo observado en campo, lo que no se puede lograr con diagramas de forma lineal. Se elaboraron 4 redes de tareas para cada

una de las 4 actividades en estudio. En la Figura 3 se muestra, a manera de ejemplo, la red de tareas de Techo nivel 1.

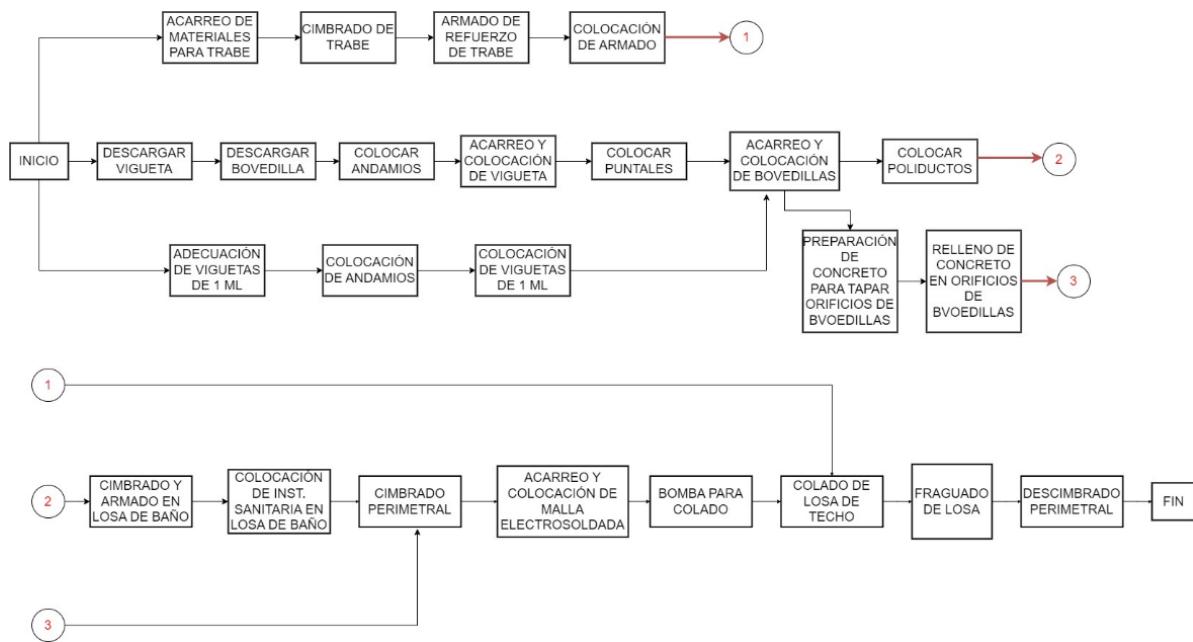


Figura 3. Red de tareas para Techo nivel 1.

Cálculo de las actividades y duraciones por cada tarea. Cada observación en campo proporcionó una duración registrada de la tarea correspondiente. A partir de esta medición, se calculó la productividad puntual de la tarea y, posteriormente, se estimó la duración total necesaria para completar el volumen total de trabajo observado. Las duraciones totales obtenidas para cada tarea conformaron conjuntos de datos que requerían ajuste estadístico para su posterior uso en simulación, mediante pruebas de bondad de ajuste.

Los datos utilizados en esta investigación fueron obtenidos directamente en campo y complementados con registros provenientes de estudios previos realizados en la Facultad de Ingeniería. El propósito fue alcanzar un mínimo de 30 observaciones por tarea, lo que

permite un ajuste confiable de distribuciones de probabilidad. De los 78 conjuntos de datos empleados, el 25 % fue generado exclusivamente durante este estudio, y el 75 % restante se integró a partir de datos propios y de investigaciones previas desarrolladas por Osorio (2015), Arias (2017) y Vázquez (2021). Estos trabajos se enfocaron en procesos de construcción de muros y techos en viviendas tradicionales en serio, en de la misma región de estudio, y emplearon formatos de levantamiento de datos compatibles con los utilizados en la presente investigación.

La productividad de cada tarea se calculó utilizando la fórmula paramétrica propuesta por el Project Management Institute (2017): $P_1 = (Q_1) / (D_1 \times N_1)$, donde P_1 es la productividad puntual de la tarea, Q_1 es el

volumen total de las unidades acarreadas durante la medición; D1 es la duración del ciclo de la tarea (en minutos) y N1 es el número de trabajadores asignados a la tarea.

Para el caso específico de tareas de acarreo, se utilizó una fórmula modificada que incorpora la distancia recorrida, de acuerdo con la propuesta de Vázquez (2021): $P_2 = (Q_2 \times L_2) / (D_2 \times N_2)$, donde P_2 es la productividad de la tarea de acarreo; Q_2 es el volumen transportado durante la medición; L_2 es la distancia entre el punto de carga y descarga (en metros); D_2 es la duración del ciclo (en minutos); y N_2 representa la mano de obra asignada (trabajadores).

Con base en las productividades obtenidas, se calcularon las duraciones totales de las tareas mediante la siguiente expresión, también recomendada por el Project Management Institute (2017): $D = Q / (P * N)$, donde D es la duración total estimada de la tarea, Q es el volumen de obra (medido en sitio o extraído de planos), P es la productividad de la tarea y N es el número de recursos humanos asignados a la tarea.

Para alimentar el modelo de simulación con los rendimientos correspondientes, fue necesario calcular el rendimiento unitario por tarea, dividiendo nuevamente cada duración estimada entre el volumen de obra respectivo. Como el modelo de simulación requiere el procesamiento de unidades de trabajo a partir de distribuciones probabilísticas, se realizó el ajuste de los rendimientos observados a funciones de distribución teórica.

El ajuste de distribuciones se llevó a cabo mediante el software *EasyFit* versión 5.6. Cada conjunto de rendimientos calculados se ingresó al software, el cual seleccionó la distribución de probabilidad que mejor se ajustaba a los datos mediante la aplicación simultánea de tres pruebas de bondad de ajuste: Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling y Chi-cuadrada. Como salida, el software proporcionó la distribución seleccionada junto con sus parámetros estadísticos correspondientes. La Figura 4 presenta un ejemplo ilustrativo del proceso de ajuste de distribución aplicado a uno de los conjuntos de datos.

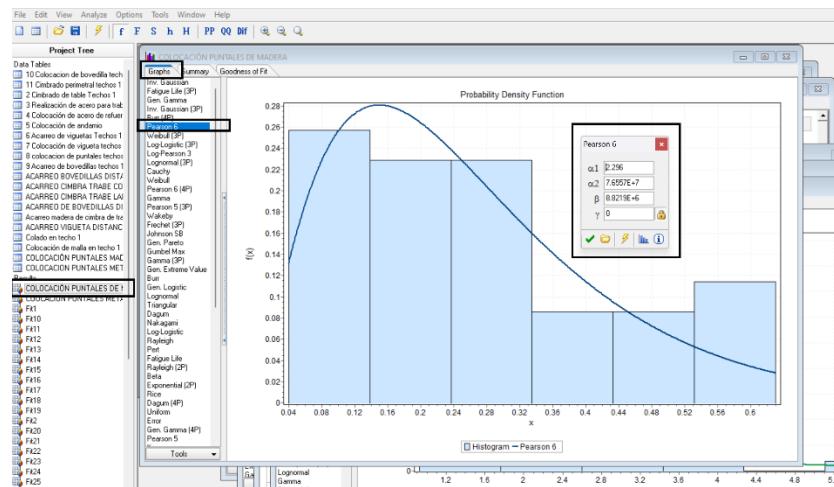


Figura 4. Ejemplo de obtención de los parámetros de distribución.

Tabla 3. Distribución y parámetros de las duraciones de la actividad Techo nivel 1.

ACT.	TAREAS	DISTRIBUCIÓN	PARAMETROS
TRABE DE CONCRETO ARMADO	Acarreos de cimbra para trabe	Log-logistic	a=4.7258 b=2.2054
	Cimbrado de trabe	Log-logistic	a=5.6938 b=7.5625
	Armado de acero de refuerzo de trabe	Log-logistic	a=4.5674 b=23.54
	Colocación de refuerzo de trabe	Log-logistic	a=2.7381 b=23.678
LOSA TIPO VIGUETA Y BOVEDILLA	Acarreo de viguetas	Pearson 5	a=5.4569 b=18.747
	Armado de andamio	Weibull	a=1.7304 b=8.2427
	Acarreo de bovedillas	Weibull	a=1.4902 b=0.57538
	Colocación de puntales con madera	Weibull	a=1.8252 b=11.96
	Acarreo de bovedillas	Weibull	a=1.4057 b=32.812
	Colocación de bovedillas	Weibull	a=3.2675 b=307.78
	Acarreo de cimbra perimetral	Log-logistic	a=4.7258 b=2.2054
	Colocación malla electrosoldada	Pearson 5	a=45.787 b=163.44
	Colado de losa de vigueta y bovedilla	Triangular	m=21.69 a=13.305 b=29.919

La Tabla 3 muestra el nombre de la distribución y los parámetros de las duraciones de la actividad Techo nivel 1. Se construyó una tabla para cada actividad (4 en total).

Modelos de simulación de los mapeos de flujo de valor actual. Con las redes de tareas de las 4 actividades estudiadas se procedió a construir los cuatro modelos de simulación con la ayuda del software *Simphony.NET* versión 4.6. Este software permite la simulación de eventos discretos, que es una técnica de modelado computarizado para representar modelos de producción real, con el objeto de evaluar diferentes escenarios de mejora, como es el caso de este estudio.

En el software se alimentó todas las tareas observadas por cada actividad (NVA, NNVA y VA), el número de trabajadores involucrados y el volumen de obra de cada tarea. Los trabajadores involucrados fueron los observados en obra y los volúmenes fueron medidos en obra, coincidiendo con los planos de construcción, salvo pequeñas diferencias. También se alimentaron las distribuciones de probabilidades y parámetros que más se ajustaron a los datos de las duraciones calculadas de cada tarea, como los de la Tabla 3. En la Tabla 4 se muestra los datos para la simulación de la actividad Techo nivel 1; se contó con 4 tablas como ésta, una por cada actividad analizada.

Tabla 4. Datos para la simulación de Techo nivel 1.

ACTIVIDAD	TAREAS		VOLUMEN	UNIDAD	EQUIPO	TRABAJADORES
TRABE DE CONCRETO	1	Acarreos de materiales para trabe	6	Pieza	A mano	1 peón
	2	Cimbrado de trabe	8	Mt	A mano	1 oficial

LOSA TIPO VIGUETA Y BOVEDILLA	3	Acarreo y armado de acero de refuerzo de trabe	4	Ml	A mano	1 oficial + 1 peón
	4	Colocación de refuerzo de trabe	8	Ml	A mano	1 peón
	5	Descarga de vigueta	12	Pieza	A mano	2 peones
	6	Descarga de bovedilla	235	Pieza	A mano	2 peones
	7	Acarreo de viguetas	11	Ml	A mano	2 peones
	8	Armado de andamio	2	Pieza	Andamio de metal estándar	2 peones
	9	Colocación de viguetas	11	Pieza	A mano	1 oficial + 1 peón
	10	Colocación de puntales	13	Pieza	Puntal de metal	1 peón
	11	Acarreo de bovedillas	235	Pieza	A mano (de a 2 pzas)	2 peones
	12	Colocación de bovedillas	220	Pieza	A mano	2 peones
	13	Adecuación de viguetas pequeñas	3	Pieza	Segueta	1 oficial
	14	Colocación de viguetas pequeñas	3	Pieza	A mano	1 oficial
	15	Colocación de poliductos	30	Pieza	A mano	1 oficial + 1 peón
	16	Cimbrado y armado de losa armada para baño	3	m2	Con madera	1 oficial + 1 peón
	17	Instalación sanitaria en losa armada	10	Ml	A mano	1 oficial + 1 peón
	18	Cimbrado perimetral para losa Techo nivel 1	32	Ml	Martillo	1 oficial + 1 peón
	19	Colocación malla electrosoldada	36	m2	Martillo	1 peón
	20	Colocación de bomba	1	Pza	Concreto premezclado	NO APLICA
	21	Preparar concreto para tapar huecos bovedilla	3	Cubeta	A mano	1 peón
	22	Tapar huecos de bovedilla con concreto	3	Cubeta	A mano	1 peón
	23	Colado de losa de vigueta y bovedilla	2.81	m3	Con bomba	2 oficiales + 2 peones
	24	Fraguado de concreto	No aplica	m3	NO APLICA	NO APLICA
	25	Descimbrado perimetral	32	Ml	A mano	2 peones

Validación de los modelos de simulación.
 Para la validación de los modelos de simulación, se comparó el tiempo total real empleado en la ejecución de las actividades observadas con el tiempo estimado promedio obtenido de mil simulaciones de cada modelo, generadas mediante el software *Symphony.NET*. Es importante señalar que, para que un modelo sea considerado confiable, la diferencia entre los tiempos reales y los

simulados no debe exceder el 20% del tiempo total (Zayed & Halpin, 2004). En la Tabla 5 se presentan los porcentajes de diferencia entre los tiempos observados y los tiempos simulados para el procedimiento constructivo seleccionado (33 días de duración). Esta comparación se llevó a cabo para los cuatro modelos que simulan las actividades estudiadas. Los resultados muestran que los cuatro modelos son aceptables, ya que los

errores absolutos observados se encuentran significativamente por debajo del umbral del 20%.

Tabla 5. Validación de los modelos de simulación.

Modelo	Duración Real Observada del Concepto de Trabajo		Simulación (minutos)	Error absoluto (%)
	(Horas)	(Minutos)		
Muros nivel 1	52:17	3,137	3,400	8.4%
Muros nivel 2	70:17	4,217	4,328	2.63 %
Techo nivel 1	28:27	1,707	1,830	7.199%
Techo nivel 2	24:04	1,444	1,630	12.88 %

Establecimiento de distintos escenarios como propuesta de mejora. Una vez calibrados y validados los modelos de simulación correspondientes al Value Stream Mapping (VSM) actual, basado en las actividades observadas en campo, se propone, como parte de las estrategias de mejora de las redes de tareas, la implementación de diversos escenarios. Estos incluyen: la incorporación de herramientas que optimicen el desarrollo de las actividades observadas, la eliminación de tareas que no agregan valor, la reducción de tiempos de espera, y la modificación en la composición de las cuadrillas para mejorar la ocupación laboral, con el fin de incrementar la productividad general.

En lo que respecta a la implementación de herramientas, se utilizaron datos provenientes de investigaciones previas realizadas en la Facultad de Ingeniería de la UADY (Vázquez, 2021), en las que se analizaron diversas herramientas aplicadas a las mismas actividades y en contextos análogos. En relación con los acarreos, se propuso una reducción estratégica en la distancia de transporte, aprovechando la disponibilidad de espacio cerca de la obra para ubicar los materiales.

Por otro lado, en cuanto a la reconfiguración de la composición de cuadrillas, las simulaciones realizadas con el software *Simphony.NET* permitieron generar reportes detallados sobre la ocupación de los trabajadores. Estos reportes facilitaron el análisis de los porcentajes de ocupación, permitiendo mejorar la productividad mediante la reducción de los tiempos de inactividad, mientras se asegura que dichos porcentajes de ocupación no superen el 85%, considerando que toda jornada laboral debe incluir descansos adecuados (Chiavenato, 2001).

Evaluación de los escenarios. Los distintos escenarios de mejora fueron simulados en *Simphony.NET* para cada una de las cuatro actividades analizadas. Según lo establecido en las Tablas 7 y 8, se definieron cinco escenarios de mejora, lo que requirió la preparación de 20 modelos de simulación adicionales a los cuatro modelos basados en los flujos de valor actuales.

Los resultados obtenidos de estas simulaciones fueron comparados para evaluar las mejoras, expresadas en términos de reducción de los tiempos de ejecución, optimización de la composición de las cuadrillas y disminución de los costos asociados a la mano de obra. Para el

análisis de la composición de cuadrillas, se revisaron los reportes de ocupación de los trabajadores que genera el software durante las simulaciones. A modo de ejemplo, en la Tabla

6 se presentan los porcentajes de ocupación para la actividad "Muros nivel 1". Se generaron reportes similares para las cuatro actividades consideradas en el estudio.

Tabla 6. Porcentaje de ocupación de trabajadores en los escenarios de Muros nivel 1.

ACTIVIDAD	PEÓN 1	PEÓN 2	ALBAÑIL 1	ALBAÑIL 2	ALBAÑIL 3
Escenario 0	71	79	89	77	
Escenario 1	75	84	96	82	
Escenario 2	70.1	75.8	90.9	77.5	
Escenario 3	71.1	76.9	92.5	78.7	
Escenario 4	71.9	80	97.7	81.3	
Escenario 4.1	75.97	83.15	64.0	88.0	64.02

Para el caso de Muros nivel 1, en la Tabla 6 se observa que el escenario más equilibrado corresponde al escenario 4.1, ya que en todos los anteriores el obrero Albañil 1 está sobreocupado. Este será el escenario más idóneo recomendado a seguir como proceso constructivo de un mapeo de flujo de valor futuro para la empresa constructora. Esto se determinó tras analizar distintas composiciones de cuadrillas, lo cual resulta sencillo, pues una vez que se cuenta con el modelo de simulación, al variar la composición, se obtienen los reportes de ocupación que se analizan.

Para la evaluación de las simulaciones en el aspecto económico, se recurrió a estimar el costo por conformación de cuadrilla, tomando como dato paramétrico un salario diario para oficial albañil de \$600 y para peón de \$400; estos datos son supuestos pero muy apegados a la realidad en Yucatán en el año 2023; representan el salario integrado, es decir, lo que se paga directamente a los trabajadores y, por lo tanto, los montos incluyen las prestaciones laborales, pero no el cargo de seguridad social. Numéricamente, los montos no son

importantes en sí, sino la relación de salarios entre oficial albañil y peón, pues los resultados son presentados en porcentajes.

Puesto que la cuadrilla original observada en el proyecto está conformada por 2 oficiales y 2 peones, el costo por cuadrilla diario sería de: Costo de cuadrilla= $2 \times 600 + 2 \times 400 = \$2000 / \text{Jor}$. Para obtener el dato de costo en minutos, se procede a convertir el precio por jornal considerando que un día laboral está conformado por 8 horas y estas a su vez por 60 min, por lo tanto, el Costo de cuadrilla = $(\$2000 / 8) / 60 = \$4.166 / \text{min}$. Este dato servirá como base para estimar los costos de acuerdo con las duraciones de los escenarios. El costo por cuadrilla varía de acuerdo con la conformación de trabajadores que tenga.

Elaboración del VSM futuro. El mapeo de flujo de valor futuro (VSM futuro) es una herramienta visual fundamental para comunicar a la empresa y a sus responsables las mejoras propuestas, basadas en los hallazgos obtenidos a partir del VSM del estado actual. No es necesario elaborar un VSM futuro para

cada uno de los escenarios analizados; basta con desarrollar un único VSM que integre las mejoras seleccionadas. En la Figura 5 se presenta, a modo ilustrativo, el VSM futuro correspondiente a la actividad “Techo nivel 1” para el escenario 4. Cabe señalar que, debido a la extensión del mapeo, la imagen no es completamente legible en el documento.

Resultados

En las tablas 7 y 8 se muestran los escenarios considerados en este trabajo para el mejoramiento de los procesos de las actividades estudiadas. Se pueden considerar escenarios adicionales y simularlos utilizando el mode

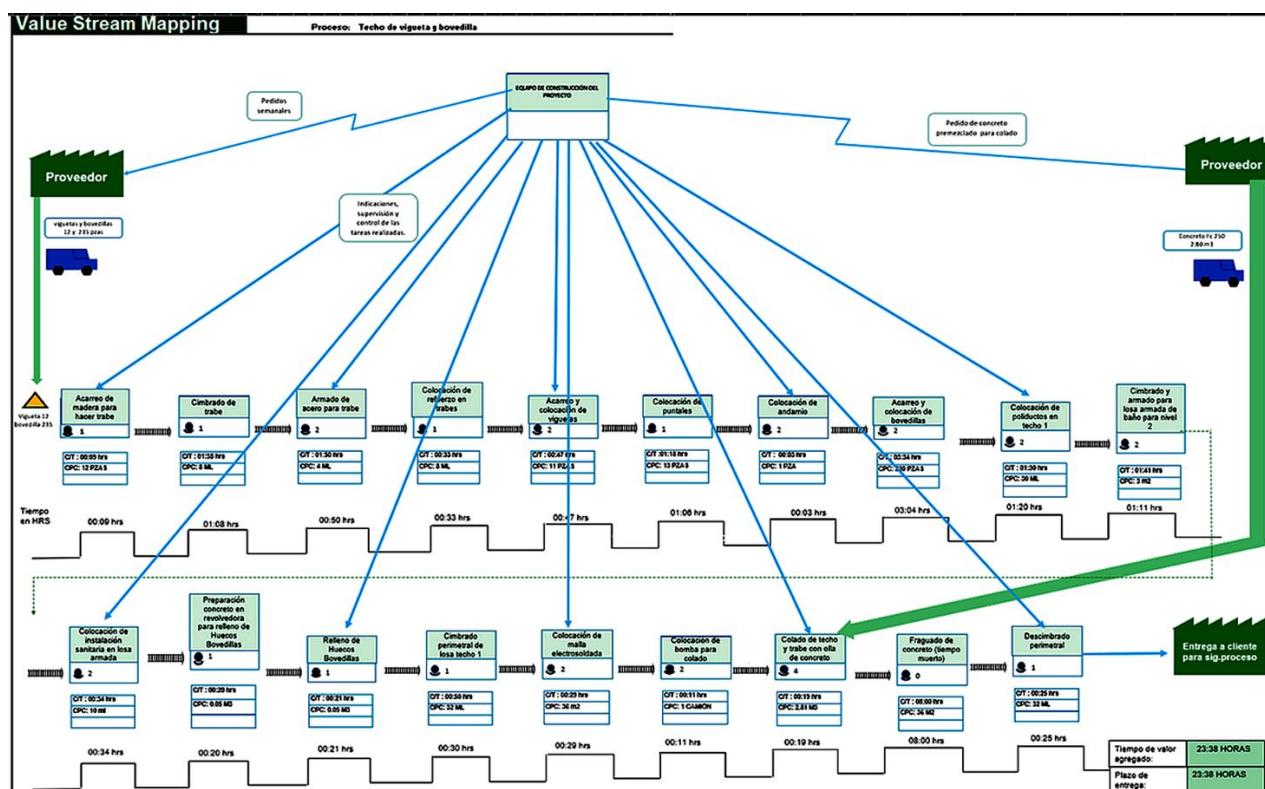


Figura 5. VSM futuro para la actividad Techo nivel 1.

Tabla 7. Escenarios para Muros niveles 1 y 2.

ESCENARIOS:	DESCRIPCIÓN:
Escenario 1, eliminar esperas. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Se eliminan aquellas actividades que no agregan valor y generan retrasos en las tareas del proceso de las actividades. (retrabajos, esperas, acarreos innecesarios, etc).
Escenario 2, incluir revolvedora.	Se observó que el concreto en la obra fue elaborado a mano, en forma artesanal. Una forma de contribuir a mejorar el tiempo de

Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	realización de esta tarea y ocupación de los recursos es mediante la utilización de una revolvedora.
Escenario 3, disminuir distancias de acarreos. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Las tareas acarreo fueron necesarias para elaborar tareas que agregan valor; estas fueron repetitivas y se realizaron a distancias de 10-25 m de acuerdo con la ubicación de los materiales. Como parte de esta mejora, se propone la ubicación estratégica de los recursos a no más de 5 m de distancia de la obra ya que se cuenta con el espacio suficiente para colocar polvo y grava, así como bovedillas, bloques y viguetas. Los cementantes y las cimbras pueden ser resguardadas dentro de la misma obra.
Escenario 4, análisis de integrar todas las mejoras anteriores. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Análisis de mejora de la productividad integrando los escenarios anteriores para determinar la ocupación de los trabajadores, así como de la duración de las tareas.
Escenario 4.1, como en 4 pero variando la cuadrilla de acuerdo con la salud laboral encontrada. Cuadrilla: 3 oficiales + 2 peones	De acuerdo con la ocupación de los trabajadores observados en el escenario 4, se propone modificar la composición de la cuadrilla original.

Tabla 8. Escenarios para techos niveles 1 y 2.

ESCENARIOS:	DESCRIPCIÓN:
Escenario 1, eliminar esperas. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Se eliminan aquellas actividades que no agregan valor y generan retrasos en las tareas del proceso de las actividades. (retrabajos, esperas, acarreos innecesarios, etc).
Escenario 2, incluir puntales metálicos. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Entre la realización de la actividad techos, la colocación de puntales de madera fue una de las tareas que no se realizaban eficientemente, puesto que tenían que acarrear maderas, modificar la altura del puntal uniendo más de una pieza; lo que contribuía a un tiempo de terminación de la tarea mayor al que podría ser con implementación de herramientas más confiables y actuales como lo son los puntales metálicos, analizar su integración en el proceso es adecuado.
Escenario 3, disminuir distancias de acarreos. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Las tareas acarreo fueron necesarias para elaborar tareas que agregan valor; estas fueron repetitivas y se realizaron a distancias de 10-25 m de acuerdo con la ubicación de los materiales. Como parte de esta mejora, se propone la ubicación estratégica de los recursos a no más de 5 m de distancia de la obra ya que se cuenta con el espacio suficiente para colocar polvo y grava, así como bovedillas, bloques y viguetas. Los cementantes y las cimbras pueden ser resguardadas dentro de la misma obra.
Escenario 4, análisis de integrar todas las mejoras anteriores. Cuadrilla: 2 oficiales + 2 peones	Análisis de mejora de la productividad integrando los escenarios anteriores para determinar la ocupación de los trabajadores, así como de la duración de las tareas.
Escenario 4.1, como en 4 pero variando la cuadrilla de acuerdo con la salud laboral encontrada. Cuadrilla: 2 oficiales + 3 peones	De acuerdo con la ocupación de los trabajadores observados en el escenario 4, se propone modificar la composición de la cuadrilla original.

En las tablas 9 y 10 se muestra las mejoras en duración y costo para todos los escenarios analizados para las actividades de Muros, tanto en planta baja (Muros nivel 1) como en planta alta (Muros nivel 2). En las tablas 11 y 12 se muestra las mejoras en duración y costo para todos los escenarios analizados para las

actividades de techos, tanto en planta alta (Techo nivel 1) como en planta alta (Techo nivel 2). Los porcentajes mostrados debajo de los minutos o de los pesos fueron calculados con respecto al resultado de la corrida del simulador con el VSM actual (escenario base) y redondeados.

Tabla 9. Comparación de escenarios para Muros nivel 1.

Modelo	Escenario Base	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 4.1
Duración (min)	3,400	2,826 17 %	3,359 1 %	3,198 6%	2,604 23%	2,080 39%
Costo comparativo (pesos)	14,167	11,775 17 %	13,996 1 %	13,325 6 %	10,850 23 %	11,267 20 %

Tabla 10. Comparación de escenarios para Muros nivel 2.

Modelo	Escenario Base	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 4.1
Duración (min)	4,338	3,880 11 %	4,147 4 %	4,003 8%	3,363 22%	2,831 35%
Costo comparativo (pesos)	18,075	16,167 11 %	17,279 4 %	16,679 8 %	14,013 22 %	15,335 15 %

Tabla 11. Comparación de escenarios para Techo nivel 1.

Modelo	Escenario Base	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 4.1
Duración (min)	1,830	1,681 8 %	1,748 4 %	1,720 6%	1,490 19%	1,418 23%
Costo comparativo (pesos)	7,625	7,004 8 %	7,283 4 %	7,167 6 %	6,208 19 %	7,090 7 %

Tabla 12. Comparación de escenarios para Techo nivel 2.

Modelo	Escenario Base	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 4.1
Duración (min)	1,630	1,398 14 %	1,617 1 %	1,587 2.6%	1,340 18%	1,293 21%
Costo comparativo (pesos)	6,792	5,825 14 %	6,738 1 %	6,613 3 %	5,583 18 %	6,465 5 %

En estas tablas, además de mostrar los porcentajes de mejora por cada escenario con respecto al escenario base, se señala el mejor resultado en las celdas sombreadas; el mejor resultado significa el escenario con el que se logra la mayor disminución, tanto en tiempo como en costo. Por ejemplo, para el caso de Muros, el mejor resultado corresponde al escenario 4.1 donde la mejora respecto al tiempo fue de un 39% para el caso de Muros nivel 1 y de un 35% para el caso de Muros nivel 2. Variando la cuadrilla para obtener una mejor organización y optimización en la realización de las tareas correspondientes a cada trabajador, se pudo incrementar la productividad, además de las mejoras realizadas con la metodología *lean construction*. Respecto a los costos por integración de la cuadrilla y con los parámetros de costos propuestos en la metodología, el escenario que presentó la mayor disminución fue el escenario 4, donde se lograban costos más bajos manteniendo la cuadrilla original; sin embargo, las duraciones eran mayores respecto al escenario 4.1.

Para el caso de Techo nivel 1 y nivel 2, el escenario 4.1 también evidenció la mayor disminución del tiempo, donde la mejora fue de 23 %, y 21 % respectivamente. Para los costos, de acuerdo con la integración de las cuadrillas y con los parámetros de costos propuestos en la metodología, el mejor escenario para techos fue el 4, donde manteniendo la cuadrilla

original se observaron mejoras de 19% para Techo nivel 1 y de 18% para Techo nivel 2.

Discusión

Esta investigación se desarrolló en el contexto de la construcción de viviendas tradicionales en Yucatán, caracterizadas por su construcción en serie. Esta característica permite aprovechar la experiencia adquirida en las primeras unidades para optimizar la productividad en las siguientes. Los escenarios analizados se centraron exclusivamente en mejorar la productividad mediante la reducción de tareas que no agregan valor, la eliminación de tiempos de espera, el uso de una herramienta o equipo específico por actividad, la disminución de distancias de acarreo y la modificación de la composición de las cuadrillas de trabajo. No obstante, la metodología utilizada puede ampliarse para evaluar otros factores que también inciden en la productividad.

Se estudiaron cuatro actividades clave: la construcción de Muros de block (incluyendo castillos, cadenas y cerramientos) en los niveles 1 y 2 y la construcción de techos de losa de vigueta y bovedilla con capa de compresión, también en los niveles 1 y 2. Estas actividades representan aproximadamente el 60 % de la duración total de la etapa de obra negra en este tipo de proyectos.

Los resultados obtenidos muestran una mejora del 18 % al 23% en el tiempo de ejecución en los escenarios 4, respecto al escenario base, lo que representa una reducción sustancial. Esto

confirma que la implementación del VSM aporta beneficios tangibles en la mejora de la productividad, como también lo han evidenciado otros estudios. Por ejemplo, Al-Sudairi (2007) reportó una reducción del 21 % en el tiempo de ejecución del pegado de bloques y del 50 % en acabados, tras aplicar VSM.

En cuanto a la composición de cuadrillas, Arias (2017) identificó que contar con dos o más oficiales mejora los tiempos de ejecución en actividades de albañilería. En este estudio, el escenario 4.1 abordó dicha variable, y al modificar la cuadrilla en la construcción de Muros (de 2 oficiales y 2 peones a 3 oficiales y 2 peones), se logró una reducción del tiempo de ejecución del 39 % en el nivel 1 y del 35 % en el nivel 2. En el caso de los techos, los peones desempeñaban una mayor carga operativa, por lo que agregar un peón adicional resultó más efectivo; así, se lograron mejoras del 23 % y 21 % en los niveles 1 y 2, respectivamente.

Botero & Álvarez (2004) destacaron la composición inadecuada de cuadrillas como un factor negativo en la productividad. En línea con esto, los resultados de este estudio muestran mejoras importantes al ajustar la proporción de oficiales y peones, confirmando la relevancia de este factor.

Por otro lado, Alinaitwe et al. (2007) identificaron diez factores que afectan negativamente la productividad, entre ellos: supervisión ineficaz, baja capacitación, retrabajos, falta de herramientas y métodos constructivos inadecuados. Varios de estos aspectos también fueron observados en este estudio. Por ejemplo, la introducción de herramientas como revolvedoras o puntales metálicos (escenario 2) mejoró los tiempos de ejecución frente al escenario original, donde dichas herramientas no estaban presentes. Además, la falta de supervisión generó tiempos de espera que, al ser eliminados (escenario 1),

contribuyeron a una mejora promedio del 12.5 % para las cuatro actividades.

No obstante, la incorporación aislada de una revolvedora en los trabajos de Muros produjo mejoras poco significativas en el tiempo de ejecución (entre el 1 % y 4 %). Esto coincide con lo reportado por Vázquez (2021), quien observó una mejora cercana al 5 % en la reducción de minutos-hombre al implementar esta herramienta. Aunque su impacto directo en el tiempo total es limitado, contribuye a una menor carga laboral para el personal, favoreciendo su desempeño.

En conjunto, los resultados confirman que la metodología aplicada —observación en campo, mapeo del flujo de valor actual, identificación de oportunidades de mejora, implementación de cambios y evaluación mediante simulación— resulta efectiva para incrementar la productividad en actividades clave de la construcción. El análisis detallado permitió identificar problemas recurrentes, proponer soluciones prácticas y validar su impacto cuantitativo a través de simulaciones.

La implementación de la simulación de eventos discretos permitió comparar diversos escenarios propuestos en el VSM futuro y evaluar cuáles aportan mayor impacto en la mejora de la productividad. Esta metodología puede replicarse en otras actividades relevantes, como cimientos de mampostería, firmes y acabados, así como en propuestas de nuevas mejoras lean, como la incorporación de herramientas adicionales (carretillas, cabrestantes, grúas) o el uso de elementos prefabricados. Estos aspectos abren nuevos temas de investigación con relación a la mejora de la productividad.

En proyectos repetitivos, como la construcción de viviendas en serie, la metodología resulta particularmente útil, ya que permite utilizar la información recolectada de forma acumulativa en fases posteriores del proyecto. Sin embargo, su escalabilidad a otros tipos de proyectos

también es viable, especialmente si se prescinde de la simulación. Una de las principales limitaciones radica en el esfuerzo que implica la recolección detallada de datos en obra, lo cual puede representar una barrera para pequeñas y medianas empresas. Si bien eliminar la simulación reduce esta carga, también incrementa el riesgo en la toma de

decisiones al no contar con estimaciones precisas del impacto de las mejoras. No obstante, diversos estudios en otras industrias han demostrado que el uso exclusivo de VSM, sin simulación, también puede ser una herramienta eficaz para mejorar la productividad.

Referencias

- Al-Sudairi, A. A. (2007). Evaluating the effect of construction process characteristics to the applicability of Lean principles. *Construction Innovation*, 7(1), 99–121.
- Alinaitwe, H., Mwakali, J., & Hansson, B. (2007). Factors affecting the productivity of building craftsmen: Studies of Uganda. *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(3), 169–176. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636434>
- Arboleda, S. A. (2014). *Análisis de productividad, rendimientos y consumo de mano de obra en procesos constructivos, elemento fundamental en la fase de planeación* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51745>
- Arcudia, C., Corona, G., & Pino, G. (2003). Absentismo y rotación en la construcción masiva de vivienda: Efecto en la productividad. *Ingeniería Industrial*, 24(2), 7.
- Arias, C. (2017). *Efecto de la composición y organización de las cuadrillas sobre la productividad en actividades de construcción de vivienda* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán].
- Baeza Pereyra, J., Solís Carcaño, R., & Arcudia Abad, C. (2003). Utilizando información acerca de productividad de mano de obra y simulaciones computacionales en el salón de clase. *Revista Ingeniería de Construcción*, 18(1), 14–21.
- Botero, L. F., & Álvarez Villa, M. E. (2004). Identificación de pérdidas en el proceso productivo de la construcción. *Revista Universidad EAFIT*, 39(130), 64–78. <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/911>
- Chiavenato, I. (2001). *Administración: Proceso administrativo* (3^a ed.). McGraw-Hill.
- Dozzi, S. P., & AbouRizk, S. M. (1993). *Productivity in construction*. Construction Engineering and Management, Civil Engineering Department, University of Alberta. <https://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/nrcc37001.pdf>
- Guasch Petit, A., Piera, M. Á., Figueras Jové, J., & Casanovas, J. (2003). *Modelado y simulación: Aplicación de procesos logísticos de fabricación y servicios*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Halpin, D. W. (1977). CYCLONE: *A computer program for the evaluation of systems of construction*. Purdue University.

- Hajjar, D., & AbouRizk, S. (1999). Simphony: An environment for building special purpose construction simulation tools. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 998–1006. Society for Computer Simulation.
- Hassan, M., & Gruber, S. (2008). Simulation of concrete paving operations on Interstate-74. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(2), 136–143.
- Hines, P., & Rich, N. (1997). The seven value stream mapping tools. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(1), 46–64. <https://doi.org/10.1108/01443579710157989>
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction* (Technical Report No. 72). Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.
- Monden, Y. (1993). *Toyota production system: An integrated approach to just-in-time* (2^a ed.). Industrial Engineering and Management Press.
- Nelson, G. (2011). *The analysis and valuation of disruption* [Tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology]. <https://cdn.hka.com/wp-content/uploads/2020/05/The-Analysis-and-Valuation-of-Disruption.pdf>
- Osorio, C. (2015). *Determinación del impacto del ausentismo de la mano de obra sobre el tiempo de ejecución de las actividades de construcción de vivienda*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán].
- Pino Rosado, G. E. (2002). *El absentismo y la rotación de los albañiles en la construcción masiva de vivienda: Variables que afectan la productividad* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán].
- Pons Achell, J. P. (2014). *Introducción a Lean Construction*. Fundación Laboral de la Construcción.
- Project Management Institute (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*, Third Edit (Newtown Square, Pennsylvania, Estados Unidos: PMBOK® Guide).
- Rojas, J., De la Torre, J., & González, R. (2017). Mapeo de flujo de valor: Una herramienta para la mejora continua en la gestión de procesos. *Revista de Ingeniería*, 31(2), 45–56.
- Schwartzkopf, W. (2004). *Calculating lost labor productivity in construction claims* (2^a ed.). Aspen Publishers.
- Serpell, A., & Peralta, R. (1991). Características de la industria de la construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 11(1), 23–30. <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/17947>
- Serpell, A. (1993). En *Administración de operaciones de construcción* (pp. 290–294). Alfaomega Grupo Editor.
- Zayed, T. M., & Halpin, D. W. (2004). Simulation as a tool for pile productivity assessment. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(6), 394–404.

Vázquez, R. (2021). *Efecto del uso de equipos alternos sobre la productividad de la mano de obra empleada en las actividades de construcción de vivienda* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán].

Yang, J. B., Huang, K. M., Lee, C. H., & Chiu, C. T. (2014). Incorporación del cálculo de pérdida de productividad en el análisis de retrasos para proyectos de construcción. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 380–388. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0128-8>