

Impacto de Lean Construction en la productividad: una revisión sistemática y lecciones para Colombia

Impact of Lean Construction on Productivity: A Systematic Review and Lessons for Colombia

Álvaro José Quintero Rojas¹   Sandra Cano¹  Romel Jesús Gallardo Amaya¹ 

¹ Universidad Francisco de Paula Santander. Ocaña, Colombia.

Resumen

Introducción: La industria de la construcción enfrenta baja eficiencia caracterizada por cronogramas incumplidos, obras inconclusas y baja eficiencia operativa. Esta situación exige replantear los métodos productivos e incorporar enfoques alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Objetivo: Analizar cómo la aplicación de Lean Construction ha contribuido a mejorar la productividad en proyectos de construcción a nivel internacional, a través de una revisión sistemática de literatura, identificando las herramientas más utilizadas, sus beneficios en términos de eficiencia, tiempos, costos y reducción de desperdicios, así como las barreras y oportunidades para su adopción en el contexto colombiano.

Metodología: Se realizó una revisión sistemática de literatura en la base de datos científicas bajo los lineamientos PRISMA, utilizando la ecuación de búsqueda "Lean Construction AND Construction AND Productivity AND Project". Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión. Los documentos fueron analizados mediante regresión no lineal para identificar la tendencia de crecimiento y se procesaron en una matriz con variables.

Resultados: Se identificaron 102 documentos que cumplieron los criterios de inclusión y exclusión. La evidencia muestra mejoras en productividad, tiempos, costos y reducción de desperdicios, con predominio de herramientas como LPS, VSM, 5S, Kanban y su integración con BIM.

Conclusiones: Lean Construction mejora productividad y sostenibilidad cuando se implementa de forma integrada y sostenida; en Colombia su adopción requiere formación estandarizada, proyectos piloto e institucionalidad que permitan una implementación progresiva y fortalecer la competitividad del sector de la construcción.

Palabras clave: Lean Construction, Productividad, Construcción.

Abstract

Introduction: The construction industry faces low efficiency characterized by missed deadlines, unfinished projects, and low operational efficiency. This situation demands a rethinking of production methods and the incorporation of approaches aligned with the Sustainable Development Goals.

Objective: To analyze how the application of Lean Construction has contributed to improving productivity in construction projects internationally, through a systematic literature review, identifying the most widely used tools, their benefits in terms of efficiency, time, costs, and waste reduction, as well as the barriers and opportunities for their adoption in the Colombian context.

Methodology: A systematic literature review was conducted in the scientific database following the PRISMA guidelines, using the search equation "Lean Construction AND Construction AND Productivity AND Project". Inclusion and exclusion criteria were applied. The documents were analyzed using nonlinear regression to identify the growth trend and processed in a matrix with variables.

Results: 102 documents were identified that met the inclusion and exclusion criteria. The evidence shows improvements in productivity, time, costs, and waste reduction, with a predominance of tools such as LPS, VSM, 5S, Kanban, and their integration with BIM.

Conclusions: Lean Construction improves productivity and sustainability when implemented in an integrated and sustained manner; in Colombia, its adoption requires standardized training, pilot projects, and institutional frameworks that allow for progressive implementation and strengthen the competitiveness of the construction sector.

Keywords: Lean Construction, Productivity, Construction.

¿Cómo citar?

Quintero AJ, Cano S, Gallardo RJ. Impacto de la construcción ajustada en la productividad: una revisión sistemática y lecciones para Colombia. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-30215260

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15260>

Recibido: 19/09/25

Revisado: 05/11/26

Aceptado: 15/04/26

Online: 12/06/26

Correspondencia

ajquinteroro@ufpso.edu.co



Contribución a la literatura:

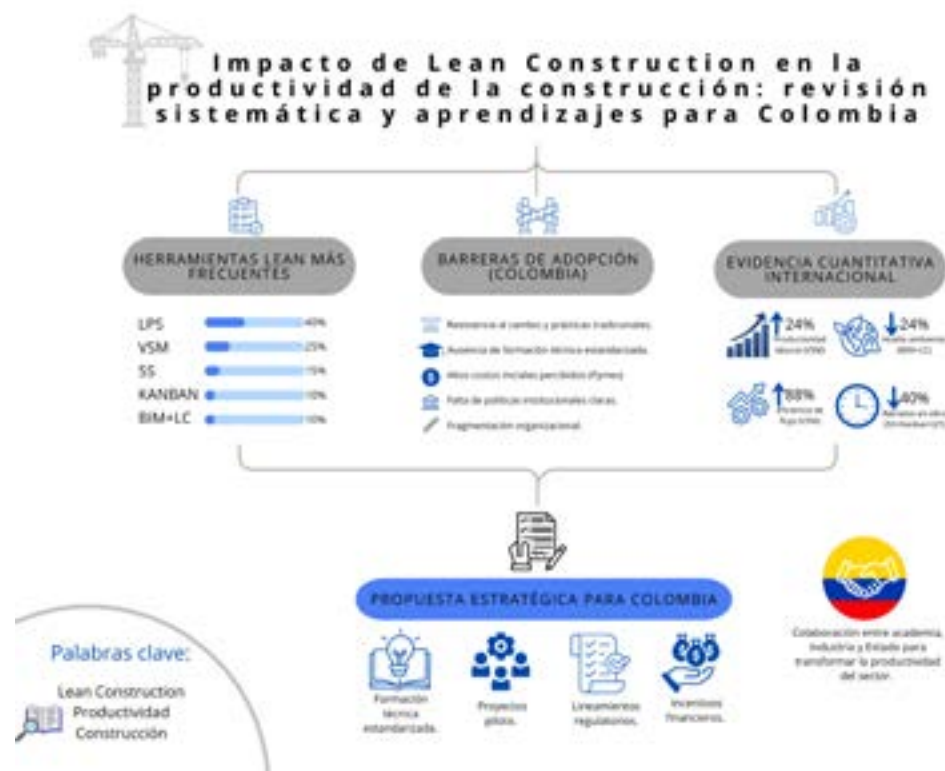
¿Cuáles fueron los hallazgos clave?

Cuatro categorías temáticas que estructuran la producción científica sobre Lean Construction: definición y evolución conceptual, principios rectores, aplicaciones prácticas (LPS, VSM, 5S, Kanban y BIM + Lean) y desafíos de la adopción. La frecuencia de uso de las principales herramientas de Lean Construction en la literatura internacional es la siguiente: LPS (40%), VSM (25%), 5S (15%), Kanban (10%) y BIM + Lean (10%), lo que confirma el predominio de LPS a nivel global. Se observaron mejoras tangibles en la productividad: incrementos del 24% en la productividad laboral y del 88% en el flujo de trabajo mediante VSM, reducciones del 30% en la duración de los proyectos, disminuciones de hasta el 31% en los residuos e incrementos en la eficiencia del ciclo de vida del producto (PCE) del 72% al 79%. En Latinoamérica, se registraron reducciones del 40,5 % en retrasos y del 52,8 % en materiales no conformes (Perú), junto con disminuciones del 18 % al 24 % en la huella ambiental (Colombia).

¿Qué aportan estos hallazgos?

Ofrecen una perspectiva integrada y comparativa internacional que facilita la transferencia de las lecciones aprendidas de las economías industrializadas a contextos emergentes, consolidando la Construcción Lean como un marco de gestión sistémica. Proporcionan un marco crítico y diagnóstico para el sector de la construcción en Colombia, contrastando las barreras locales con experiencias internacionales exitosas y brindando a empresas, asociaciones comerciales e instituciones académicas evidencia para guiar las decisiones de adopción. Apoyan la formulación de políticas públicas mediante una estrategia nacional integrada (formación estandarizada, proyectos piloto, incentivos financieros para las PYMES y difusión de casos de éxito), alineada con los ODS 9 y 11. Constituyen un llamado a la formación académica, al evidenciar la brecha curricular en Lean Construction dentro de los programas de Ingeniería Civil en Colombia y al alentar

Graphical Abstract





Introducción

La baja eficiencia en la gestión de recursos en las obras representa un problema significativo en la industria a nivel mundial, caracterizado por retrasos, sobrecostos y reestructuraciones que comprometen los resultados finales del proyecto (1). A pesar de los avances tecnológicos y las nuevas metodologías de gestión, el sector sigue rezagado respecto a otros en cuanto a eficiencia, un hallazgo coherente con múltiples informes recientes que muestran que, a nivel mundial, la productividad en la construcción solo ha crecido un 1% anual en las dos últimas décadas, muy por debajo de la media global del 2,8% registrada en otros sectores (2).

En el caso específico de Colombia, y según datos del Departamento Nacional de Estadística Administrativa (DANE), una comparación entre el cuarto trimestre de 2023 y la proyección oficial para el cuarto trimestre de 2024 muestra una disminución en el área aprobada para viviendas de interés social (VIS) y construcción residencial fuera del VIS, con descensos del 7,2% y 1,96%, respectivamente (3). Este fenómeno puede atribuirse al aumento significativo del índice de costes de construcción de viviendas, que se situó en el 6,87%, reflejado en un incremento de los precios de la nueva vivienda de hasta un 4,9% para 2025 (3). Esta situación ha provocado cambios significativos en la dinámica del sector, especialmente en lo que respecta a las limitaciones de productividad y las fallas en la gestión del tiempo y la finalización de proyectos, lo que pone de manifiesto la urgente necesidad de replantear los métodos tradicionales de construcción in situ.

Ante este desafío, se han propuesto diversas estrategias centradas en la gestión sostenible de la construcción, con el objetivo de contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11) e Industria, Innovación e Infraestructuras (ODS 9). En este contexto, se pone énfasis en la responsabilidad social y medioambiental de la industria, y cada vez se adoptan más enfoques estratégicos como la Construcción Enxuta, que ha ganado reconocimiento como una alternativa viable para transformar los procesos constructivos en la industria (4). Este enfoque se inspiró en el Sistema de Producción Toyota, que se centra en generar valor continuo para el cliente mediante la eliminación sistemática de residuos, la mejora de los flujos de trabajo y la planificación colaborativa, utilizando herramientas como el Sistema de Última Planificación (LPS), el Mapeo de Flujo de Valor (VSM), Kanban, la Metodología 5S y el Intercambio de Datos de Un Minuto (SMED), entre otras. Estas herramientas permiten gestionar el trabajo desde una perspectiva sistémica, adaptándose tanto a proyectos altamente complejos como a obras de pequeña escala (5). Estudios recientes (4) (6) muestran que la implementación de la Construcción Esbelta se ha asociado con mejoras significativas en la eficiencia constructiva, reducción de la duración de los proyectos y una utilización optimizada de los recursos. Sin embargo, en el contexto colombiano, persisten problemas de productividad y cumplimiento de los plazos, lo que pone de manifiesto la necesidad de adaptar y fortalecer la implementación de la Construcción Enxuta a las condiciones locales del sector (7).

Los estudios globales revisados coinciden en que la filosofía de Construcción Enxuta tiene el potencial de mejorar significativamente la gestión de proyectos, especialmente optimizando los recursos, minimizando el desperdicio, aumentando la fiabilidad de la planificación y mejorando la calidad de los procesos, especialmente fomentando una cultura de evaluación del desempeño,





formando al personal en herramientas de Construcción Enxuta y promoviendo su integración en todas las fases y niveles de los proyectos de construcción (8) (9).

En este contexto, este artículo pretende analizar cómo la Construcción Enxuta ha contribuido a mejorar la productividad en obras de construcción a nivel mundial, mediante la síntesis de evidencia empírica y teórica, identificando conceptos clave, herramientas aplicadas, estudios de caso relevantes y conocimientos accionables para la toma de decisiones.

Metodología

Para realizar esta revisión, se realizó un análisis sistemático de la información utilizando la base de datos Scopus y siguiendo la metodología PRISMA (10). Para este propósito, se utilizaron los términos de búsqueda "Lean construction And construction And productivity And Project". Para el análisis, se construyó una curva de regresión no lineal para encontrar el punto de inflexión del marco temporal de publicación e identificar tendencias de publicación dentro de la base de datos (11).

Esta técnica fue elegida frente a los modelos lineales tradicionales porque el crecimiento en las publicaciones de Lean Construction no sigue un patrón estrictamente lineal, sino que presenta fases de aceleración y estabilización. El ajuste no lineal permitió una representación más precisa de la evolución temporal y reforzó la validez del análisis bibliométrico.

Se aplicaron los siguientes criterios de inclusión:

- Artículos publicados entre 2015 y 2025.
- Publicaciones indexadas en la base de datos Scopus.
- Estudios sobre la aplicación práctica de la Construcción Enxuta en proyectos de construcción.
- Estudios que informan de métricas de productividad (coste, tiempo, eficiencia, entre otras)

Se consideraron los siguientes criterios como criterios de exclusión:

- Documentos sin aplicación práctica (solo conceptual o teórica)
- Publicaciones sin acceso al texto completo ni duplicados.
- Estudios fuera del plazo establecido.
- Artículos sin informes de métricas de productividad.
- Estudios con datos insuficientes para análisis comparativos.

Los artículos seleccionados se organizaron luego en una matriz de extracción de datos, donde se clasificaron por: tipo de proyecto, herramientas de construcción Lean aplicadas (LPS, VSM, 5S, Kanban, entre otras), métricas de productividad evaluadas (tiempo, costes, eficiencia, residuos, huella ambiental) y región de aplicación.

Finalmente, los datos procesados se analizaron comparativamente para identificar patrones comunes en mejoras de productividad, así como barreras y oportunidades de implementación. Este proceso permitió establecer un vínculo claro entre la aplicación de la Construcción Enxuta y sus efectos en la productividad.





Aunque el enfoque metodológico de esta revisión es de alcance global, algunas secciones del manuscrito incluyen ejemplos nacionales —como el caso de Colombia— para contextualizar los hallazgos internacionales y demostrar su aplicabilidad en contextos específicos. Estos casos ilustrativos ayudan a mejorar la comprensión y facilitan la aplicación práctica de los hallazgos obtenidos a nivel global.

En total, se identificaron y analizaron 102 artículos que cumplieran los criterios de inclusión; De estos, 61 estudios son citados explícitamente en el texto debido a su relevancia teórica o empírica, mientras que los artículos restantes se consideraron exclusivamente para el análisis cuantitativo y para informar el desarrollo de categorías temáticas.

La literatura reciente incluye varias revisiones sistemáticas sobre la Construcción Lean que han ayudado a consolidar su base teórica y práctica en la gestión de proyectos, como (12), que realizó una revisión exhaustiva de la filosofía Lean y su relación con el sistema de ejecución de proyectos, destacando la evolución histórica del enfoque y su integración con el Modelado de Información de Edificios (BIM) y la Entrega Integrada de Proyectos (IPD). Además, (13) realizó un análisis de 80 publicaciones indexadas entre 2017 y 2021, destacando el impacto positivo de la adopción de la Construcción Enxuta en la reducción de costes y residuos, especialmente en América Latina. Por su parte, (14) realizó una revisión sistemática de los artículos publicados entre 2019 y 2023, destacando la creciente sinergia entre la Construcción Esbelta y el BIM a nivel global, así como las diferencias culturales y regionales en su implementación.

A diferencia de estudios anteriores, esta revisión incorpora un marco temporal más amplio, considerando fuentes publicadas hasta 2025, y aplica un análisis bibliométrico basado en la metodología PRISMA, complementado con técnicas de regresión no lineal, lo que permite una identificación más precisa de las tendencias en la producción científica sobre el tema. Además, se adopta un enfoque comparativo internacional que busca extraer lecciones de la literatura global para guiar futuras aplicaciones de la Construcción Lean en contextos emergentes.

Resultados

Según la información obtenida de la base de datos Scopus, se identificaron 536 documentos publicados relacionados con la Construcción Enleja entre 2015 y 2025; Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se identificaron 102 documentos publicados. Esta visión refleja la importancia de esta estrategia dentro de este sector industrial, así como su implementación en el marco de un mundo más sostenible. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 1, es evidente que las publicaciones sobre Construcción Enxuta han aumentado significativamente, especialmente en respuesta a políticas internacionales como los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y ahora a los compromisos establecidos en los ODS, que sustituyeron a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) en 2015. Además, las tendencias de investigación relacionadas con la Construcción Enxuta se han centrado en los cambios en el sector de la construcción, su aplicación para reducir los impactos medioambientales causados por el desarrollo de la industria y la adopción de sus principios para lograr la estandarización de los procedimientos y su definición dentro de un marco conceptual que pueda aplicarse a la dinámica del sector de la construcción.

Esta tendencia se alinea con los patrones globales identificados por (12) y (14), quienes informan de un crecimiento sostenido en publicaciones sobre Construcción Enxuta vinculadas a la digitalización y sostenibilidad del sector.

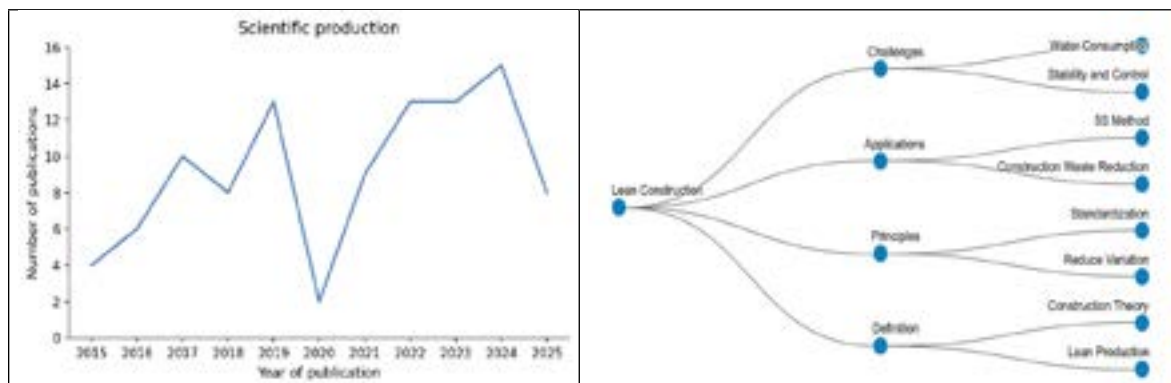


Figura 1. Análisis de documentos publicados en la base de datos Scopus. Fuente: Scopus

En línea con las tendencias actuales, los componentes principales de la filosofía Lean Construction están claramente definidos, organizados en cuatro secciones: definición, principios, aplicaciones y desafíos. En la primera sección, para guiar la optimización de procesos y eliminar actividades que no aportan valor, la teoría de la construcción está vinculada a la producción lean.

Los 102 estudios analizados se clasificaron en cuatro categorías temáticas principales:

Definición: Incluye obras que describen la evolución conceptual de la Construcción Enxuta y su relación con la fabricación enxuta (15) (16) (12) (17).

Principios: Incluye estudios que destacan los principios esenciales para garantizar la eficiencia y estabilidad del proyecto, como la estandarización de procesos, la mejora continua, el flujo de trabajo y la eliminación de residuos (4) (18) (19) (20).

Aplicaciones: Compila estudios de caso sobre la implementación de herramientas Lean, incluyendo LPS (20) (21) (22), VSM (5) (23) (24), la Metodología 5S (25) (26) y Lean + BIM (12) (27).

Desafíos: Incluye estudios que abordan barreras culturales, formativas y financieras que dificultan la adopción de la Construcción Enxuta (7) (8) (28) (29) (30)

Estos resultados son coherentes con los hallazgos de (25) y (26), quienes documentan mejoras en la eficiencia operativa, el control ambiental in situ y la formación basada en VSM para reducir los tiempos de ciclo y el desperdicio en proyectos de construcción. Estos hallazgos son coherentes con la evidencia presentada por (18) y (31), quienes destacan la importancia del control ambiental y la documentación de procesos para la productividad de la Construcción Lean.

En conjunto, esta perspectiva refleja una tendencia de investigación que posiciona la Construcción Enxuta como un paso clave hacia una construcción más eficiente, limpia y sostenible mediante la implementación de estrategias diseñadas para optimizar el uso de materiales y reducir residuos,



disminuyendo así el impacto ambiental y alineándose con las políticas globales de producción responsable y eficiencia energética.

Al integrar la Construcción Lean, el objetivo es lograr proyectos más seguros con mayor competitividad y valor añadido; también se establece como una herramienta estratégica para vincular los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con la productividad del sector.

Los orígenes y la evolución de la construcción engrosada

La filosofía de Construcción Enxuta surgió como una adaptación de los principios de Fabricación Enxuta a los procesos constructivos, con el objetivo de maximizar el valor para el cliente y reducir el desperdicio en cada etapa del proyecto. Como resultado, este enfoque se ha consolidado como una estrategia clave para la eficiencia y eficacia en la industria de la construcción, basándose en teorías como las expuestas por (15) y desarrolladas por (16), que articulan los principios de la construcción eficiente, basados principalmente en la eliminación de actividades no de valor añadido, la mejora continua, la reducción de la variabilidad y la gestión de flujos de trabajo. Asimismo, estudios realizados por (12) sobre el enfoque Lean Construction destacan la evolución hacia un enfoque sistémico de la gestión de proyectos que promueve la planificación colaborativa, la integración de tecnologías digitales como el BIM y la alineación de los equipos en torno a objetivos comunes de productividad y calidad. Además, estudios como los de (4) y (6) han demostrado que la aplicación sistemática de estos fundamentos mejora significativamente los indicadores de productividad in situ.

En este sentido, los estudios más recientes coinciden en que la filosofía de la Construcción Esbelta ha sido eficaz para abordar los problemas tradicionales del sector, especialmente los relacionados con retrasos, sobrecostos y baja productividad. En consecuencia, un estudio reciente (57) confirma tendencias emergentes en la Construcción Enxuta, señalando que los principales países de investigación incluyen Estados Unidos, Australia, China y Chile; También enfatiza que su implementación ayuda a mejorar la eficiencia operativa mediante la simplificación de procesos, la estandarización de tareas y el uso eficiente de los recursos. Por esta razón, se ha realizado investigación sobre Construcción Lean, herramientas digitales y su integración con la metodología BIM utilizando métodos de investigación como estudios de caso, encuestas, entrevistas y experimentación.

Sin embargo, dentro del marco de la Construcción Enxuta, se ha propuesto un modelo que integra los principios de sostenibilidad y busca mejorar la eficiencia en este sector mediante la adopción de métodos y prácticas eficientes. Este modelo pretende lograr un control justo a tiempo de fabricación y inventario, así como una colaboración continua con personas y socios —reconociendo su importancia para el éxito del modelo— al tiempo que enfatiza el trabajo en equipo, la formación y la creación de una cultura de aprendizaje continuo (Figura 2).

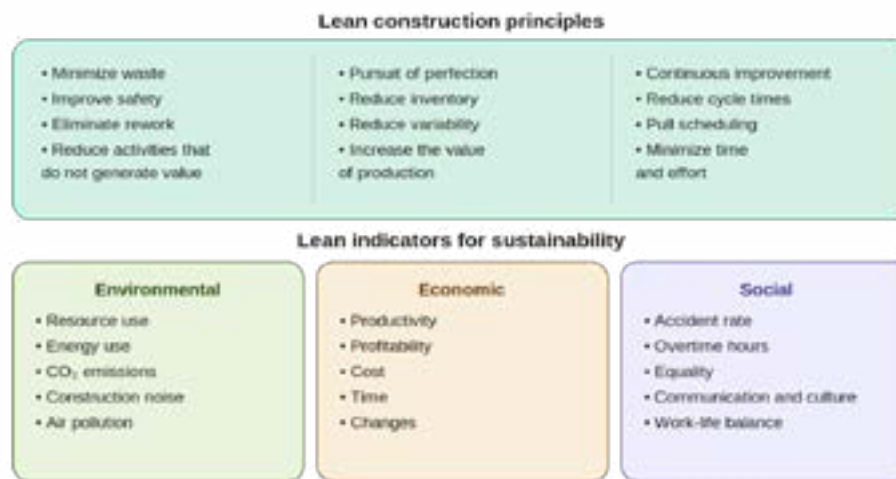


Figura 2. Elementos de la Construcción Enxuta para la industria sostenible. Fuente: Autor.

Como resultado, los análisis realizados desde esta perspectiva han dado lugar a contribuciones como una profunda comprensión de los principios y fundamentos de la Construcción Enxuta, el desarrollo de herramientas y técnicas que promueven la adopción de este enfoque, la evidencia empírica del impacto positivo logrado a través de la Construcción Enxuta, el desarrollo de estrategias de sensibilización para adoptar la Construcción Enxuta dentro del marco de la construcción sostenible, y la consolidación de los marcos teóricos y conceptuales que sustentan el enfoque (18)

En este sentido, la base teórica también se ha reforzado mediante la incorporación de conceptos avanzados en la planificación y control de actividades intrínsecas a la industria, como propone (33), quien reconoce la importancia de adoptar un enfoque triple en la industria de la construcción—basado en la transformación, el flujo y la creación de valor—que permita una comprensión más completa del proceso constructivo, ya que se ha convertido en un foco clave para el desarrollo de herramientas como LPS, cuya aplicación se ha expandido a proyectos residenciales, de infraestructuras y mantenimiento.

De manera similar, se han demostrado resultados positivos mediante la implementación de la Construcción Enxuta en diversos contextos, como se señala en (34), que documenta mejoras en la planificación y el rendimiento del mantenimiento ferroviario en Suecia mediante la aplicación de los principios de Construcción Enxuta, mientras que estudios realizados en Asia han mostrado reducciones significativas en costes y tiempos de ejecución, así como una mayor previsibilidad en la ejecución de las actividades. Lo cual se debe a la gestión visual, la mejora continua y la colaboración temprana entre los actores implicados en el proyecto.

Además de sus fundamentos técnicos, la Construcción Lean también implica transformaciones organizativas, ya que implica cambios fundamentales en la cultura del proyecto, implicación y implicación de la alta dirección, y desarrollo de competencias dentro de los equipos de trabajo, donde el análisis de tendencias constructivas, la investigación y experimentación continuas, y el



aprendizaje organizativo se convierten en piedras angulares para sostener la implementación a lo largo del tiempo y lograr impactos reales en la productividad y la calidad del producto final (17).

Lean Construction ha evolucionado de un enfoque en la mejora continua a convertirse en un sistema integral de gestión de proyectos. Al combinar principios, herramientas técnicas y procesos que involucran a todos los interesados dentro de la organización, ha tenido un impacto positivo en la industria de la construcción y se ha consolidado como una alternativa viable y eficaz a los métodos tradicionales, sirviendo como un motor clave de la transformación de la productividad en las obras.

Productividad en la obra

En la industria de la construcción, la productividad se observa desde diversas perspectivas, lo que aporta una visión del equilibrio que debe existir entre los recursos utilizados y los resultados obtenidos. Uno de los principales enfoques para la productividad es el técnico, cuyo objetivo principal es aumentar la producción utilizando el menor número posible de recursos (35). En el contexto de la construcción, esto implica optimizar procesos como una mejor planificación, gestión de recursos y control de calidad durante las fases de ejecución del proyecto. En consonancia con la teoría, la productividad aumenta cuando se implementan tecnologías avanzadas y los recursos humanos, físicos y materiales se coordinan eficientemente (1). Para lograrlo, la industria de la construcción ha centrado su atención en el uso de herramientas tecnológicas, como los sistemas de gestión de la construcción y el Modelado de Información de Edificios (BIM), que buscan facilitar la optimización del tiempo y reducir los costes operativos, logrando así una mayor eficiencia y rentabilidad en los proyectos de construcción, como se detalla en el (2) (35)(36)(31), que abordan las métricas de productividad desde una perspectiva técnica y multidimensional.

Dada esta tendencia, la productividad in situ se ha centrado en la capacidad de hacer un uso eficiente de los recursos disponibles—especialmente la mano de obra, los materiales, el equipamiento y el presupuesto—asegurando así que los proyectos se ejecuten completamente sin comprometer la calidad del producto. Partiendo de esta premisa, la productividad se mide por la proporción entre el volumen de trabajo completado (producción) y los recursos invertidos en tiempo, esfuerzo y materiales (insumos), lo que facilita la identificación de indicadores clave para analizar el rendimiento operativo de los proyectos de construcción (31).

En consecuencia, este enfoque se ha utilizado para realizar análisis en diferentes niveles según el objetivo de medición; Por ejemplo, se han realizado estudios que detallan la evaluación de actividades específicas durante el curso de la obra (3); estos enfoques permiten a los gestores de proyectos identificar cuellos de botella, verificar el progreso respecto al calendario y tomar decisiones correctivas oportunas en la búsqueda de objetivos económicos y medioambientales (37).

Uno de los mayores retos a la hora de medir la productividad es la falta de criterios estandarizados y de herramientas integradas de recopilación de datos (4), ya que muchas organizaciones aún dependen de registros manuales, lo que limita la precisión y dificulta la comparación entre diferentes proyectos o empresas. A esto se suman factores específicos de la obra, como condiciones



variables en el lugar, problemas logísticos e interrupciones relacionadas con el clima, que provocan fluctuaciones en el rendimiento y dificultan la obtención de una evaluación objetiva (31).

Por tanto, es importante entender que la productividad in situ no depende únicamente de la ejecución técnica, sino de diversos factores organizativos y humanos, incluyendo, notablemente, la experiencia del personal, la claridad de las especificaciones técnicas, la existencia y calidad de la planificación, la entrega puntual de materiales, la supervisión constante en el lugar y la coordinación efectiva entre los interesados del proyecto (23). Es importante señalar que la ausencia de estos elementos puede provocar un aumento del tiempo de inactividad, reestructuraciones y retrasos innecesarios en la obra, y, como resultado, afectar negativamente al rendimiento global.

En la industria de la construcción, las métricas más utilizadas incluyen los metros cuadrados de muros construidos, el volumen de hormigón vertido por un equipo en una sola jornada laboral y el porcentaje de actividades planificadas que se han completado. Investigaciones como la citada en (37) indican que la efectividad de las métricas mencionadas como herramienta de control no es absoluta, ya que depende de factores como el tipo de proyecto, la complejidad de las actividades constructivas y el nivel de tecnología empleada en el proyecto. Asimismo, (38) y (37) utilizan estos indicadores como parámetros de control operativo para evaluar la eficiencia del proyecto. Por esta razón, para abordar estos desafíos, se han propuesto diversas herramientas que pueden integrarse entre sí, como VSM, Percent Plan Completed (PPC), LPS y sistemas de seguimiento digital basados en BIM (27). Estas herramientas permiten un seguimiento en tiempo real del progreso, permitiendo así ajustes oportunos durante la ejecución del proyecto (39). En consecuencia, la productividad en los proyectos de construcción es un fenómeno técnico y multidimensional fuertemente influenciado por las condiciones contextuales; la gestión eficaz de la productividad requiere el uso de herramientas de medición fiables, personal formado y metodologías colaborativas que permitan anticipar posibles limitaciones, minimizar el desperdicio y alinear el flujo de trabajo con los objetivos de producción (5).

Construcción Enxuta y sus herramientas para la productividad

Diversos estudios, como los citados en (19) y (20), han demostrado que la aplicación de la Construcción Enxuta tiene un impacto directo y positivo en la productividad in situ, ya que su implementación ayuda a reducir el desperdicio, mejorar el flujo de trabajo y aumentar la fiabilidad de la planificación del trabajo (6). Así, al centrarse en la creación de valor y la eliminación de actividades que no contribuyen al producto final, la filosofía de Construcción Ágil introduce cambios sustanciales en la gestión de la producción en la obra, especialmente en términos de optimizar el uso de recursos y maximizar la eficiencia operativa, fomentando al tiempo una cultura de mejora continua. En este sentido, (19)(40)(20)(41) demuestran aumentos en la productividad mediante la implementación de LPS y otras herramientas Lean, lo que reafirma la eficacia de este enfoque en diversos tipos de proyectos de construcción.

Una de las herramientas más importantes en la Construcción Enxuta es la LPS, que ha demostrado ser eficaz para mejorar la planificación a corto plazo estableciendo compromisos realistas entre quienes se encargan de llevar a cabo las actividades. Según (20), el aumento de la PPC está



directamente vinculado a una mejora de la productividad in situ, lograda mediante la correcta implementación de LPS. Esta herramienta ayuda a reducir los tiempos de inactividad o de espera, mejorar el flujo de trabajo y disminuir la incertidumbre durante la ejecución de las actividades. En la misma línea, (21) indica que estos efectos se traducen en una mejor utilización de los recursos disponibles. Estos resultados son coherentes con los reportados por (20) y (21), quienes documentaron aumentos en la PPC y mejoras en la fiabilidad de la planificación mediante la implementación de LPS y sistemas de seguimiento basados en datos vinculados.

Además, la VSM es una de las herramientas clave de la Construcción Lean para identificar residuos en diversos procesos operativos, ya que facilita la visualización de flujos de trabajo actuales y en estado objetivo, permitiendo la detección de cuellos de botella y problemas de coordinación (58). Su implementación en proyectos ha demostrado ser eficaz mediante adaptaciones específicas, como la organización de la instalación de estructuras metálicas, la optimización de la logística de entrega de materiales y la optimización de actividades recurrentes en proyectos de tamaño medio; Todo esto contribuye a un trabajo más ágil y coordinado (59)

Además, la aplicación de la Construcción Enxuta en proyectos de infraestructura ha promovido prácticas como la planificación visual del lugar, reuniones colaborativas de producción y documentación controlada de las restricciones. Estas estrategias han conducido a una mejora del rendimiento del equipo, al cumplimiento de plazos establecidos y a una reducción del desperdicio de materiales (42). Además, se ha evidenciado un impacto positivo en la motivación del equipo y en la capacidad de toma de decisiones in situ, factores que contribuyen a reducir el tiempo de inactividad (43).

Como resultado, un factor clave para lograr mejoras en la productividad laboral es la implementación de la Construcción Enxuta, que permite su integración con tecnologías como el BIM. Esta integración permite anticipar errores durante la ejecución, optimiza la secuencia de actividades y crea lugares de trabajo más eficientes y seguros (32). Esta combinación genera un impacto integral en la gestión de proyectos, mejorando la eficiencia operativa y aumentando la probabilidad de cumplir los objetivos de coste, tiempo y calidad mediante procesos más organizados y precisos.

La implementación de la MVV en el sector de la construcción ha demostrado ser altamente eficaz, como se demuestra en (5) y (23), en diversos contextos de aplicación, incluyendo estudios de laboratorio y de campo, resultando en un aumento del 24% en la productividad laboral, una mejora del 88% en la eficiencia del flujo de trabajo y fomentando una mayor participación activa de los trabajadores, factor clave para lograr estos beneficios (60). Otro caso de aplicación involucra un proyecto de acero estructural, que redujo la duración del proyecto en 13 días, equivalente al 30% del tiempo total programado (24).

De manera similar, la aplicación de herramientas Lean como 5S, Kanban y JIT tiene un impacto positivo en la productividad operativa al reducir el desperdicio y mejorar el flujo de trabajo. La técnica 5S organiza el lugar de trabajo en cinco pasos: ordenar, ordenar, brillar, estandarizar y mantener; Kanban gestiona visualmente el flujo de materiales y tareas, regulando los inventarios



según la demanda; y JIT suministra materiales exactamente cuando es necesario para evitar acumulaciones. Albertini et al. (25) documentan mejoras en la eficiencia productiva mediante el control sistemático de los procesos en obras, mientras que Wang et al. (26) demuestran que la formación basada en VSM en entornos de realidad virtual reduce los tiempos de ciclo y el desperdicio, validando el potencial de estas herramientas para mejorar la productividad en la construcción.

Además, prácticas como Kaizen, Mantenimiento Productivo Total (TPM) y Poka-Yoke mejoran la seguridad y calidad en el trabajo, incrementando así la eficiencia en la ejecución de los proyectos. Kaizen se centra en la mejora continua, con especial énfasis en realizar pequeñas y consistentes mejoras en los procesos. TPM establece el mantenimiento preventivo de equipos, involucrando a todo el personal en el cuidado y mantenimiento de la maquinaria utilizada. Poka-Yoke se centra en prevenir errores durante los procesos, garantizar la calidad y reducir riesgos (44) (45).

Por lo tanto, el impacto combinado de diversas herramientas y/o principios de Lean Construction conduce a mejores resultados in situ, como la eficiencia operativa, la mejora en los lugares de trabajo y la reducción del tiempo de inactividad, logrados gracias a las contribuciones individuales de cada uno.

Estudios de caso internacionales sobre construcción y productividad enxuta

La aplicación de la Construcción Enxuta en diferentes regiones del mundo ha generado mejoras significativas en la productividad in situ, como demuestra (43) en China, especialmente al optimizar procesos, reducir el desperdicio y cumplir con los plazos. Desde un punto de vista metodológico, estudios en Asia y el norte de África han documentado la implementación de herramientas como la MVM y el diagrama de Ishikawa para identificar causas raíz en una obra de construcción (45). Estos análisis han demostrado que la eficiencia del ciclo de procesos (PCE) aumentó del 72% al 79%, mientras que el desperdicio asociado a inventarios innecesarios, sobreproducción y defectos se redujo hasta en un 31% (45%).

Además, (43) desarrolló un método basado en la digitalización y el aprendizaje automático para evaluar mejoras en procesos de construcción fuera del sitio, integrando datos de sensores RFID con modelos BIM para aumentar la eficiencia de la producción y apoyar la toma de decisiones basada en datos en tiempo real.

Del mismo modo, en Suecia (46), los principios de Construcción Enxuta se aplicaron a un proyecto de mantenimiento ferroviario, lo que resultó en mejoras en la planificación y en el cumplimiento de los objetivos contractuales; sin embargo, se identificaron barreras significativas relacionadas con la limitada formación técnica del personal operativo, que limitaba el impacto total de las herramientas Lean Construction.

En el caso específico de América Latina, la evidencia empírica también muestra resultados alentadores, como se vio en Chile, donde (47) analizó el uso de contratos colaborativos desde una perspectiva de Construcción Enxuta, identificando mejoras en la cooperación, la eficiencia organizativa y la alineación de objetivos entre los actores del proyecto. (48) documentó cómo la





armonización de procesos de construcción repetitivos mediante tasas de producción basadas en el aprendizaje mejora la coordinación y reduce la variabilidad en los proyectos de construcción. En la misma línea, (49) identificó diferencias entre la planificación “ideal” y la ejecución “real” al aplicar LPS, revelando que los esfuerzos por eliminar restricciones influyen directamente en la productividad final.

Mientras tanto, en Perú (26), herramientas como JIT, Kanban y 5S se implementaron en empresas medianas del sector de la construcción urbana, lo que resultó en una reducción del 40,5% en los retrasos, una mejora del 47,2% en la precisión de las estimaciones y una disminución del 52,8% en materiales no conformes. Así, en las condiciones de la pandemia de COVID-19, (50) señaló que la adopción de la Construcción Esbelta mejoró la planificación y la comunicación en los proyectos residenciales, a pesar de condiciones de alta incertidumbre y limitaciones operativas.

En Ecuador (51), la Construcción Enjuagada se aplicó a un proyecto de vivienda de interés social, reduciendo con éxito el tiempo y los costes sin afectar la adaptabilidad del diseño, a pesar de las restricciones regulatorias y financieras, mientras que en Colombia (52) se compararon dos proyectos de construcción con características similares: uno usando el enfoque tradicional y otro aplicando prácticas de Construcción Enxuta mediante análisis del ciclo de vida con OpenLCA, lo que resultó en una reducción del 18% al 24% en la huella ambiental, reflejando una mejor utilización de materiales y procesos más eficientes, mientras que (52) integró el BIM con un modelo de valor para la evaluación de sostenibilidad en un proyecto de infraestructura de puentes, demostrando que la integración de herramientas Lean y digitales permite tomar decisiones de diseño optimizadas y reducir el impacto ambiental del proceso constructivo.

Estos estudios demuestran que la Construcción Enxuta genera mejoras tangibles en la productividad in situ, tanto en contextos industriales como emergentes, ya que los beneficios observados — como la reducción de residuos, la mejora del flujo de trabajo, una planificación más fiable y una mayor eficiencia logística— validan el potencial transformador de esta filosofía en el sector de la construcción, especialmente en América Latina, donde existe un interés creciente en prácticas sostenibles y de alto rendimiento.

Para facilitar la comprensión de los hallazgos, la Tabla 1 resume las herramientas de Construcción Enxuta más utilizadas en los casos analizados, junto con sus principales beneficios. Además, la Figura 3 muestra gráficamente su distribución porcentual, destacando la predominancia de los LPS sobre otras metodologías.



Tabla 1. Las herramientas de Construcción Enxuta más citadas en estudios internacionales y sus beneficios asociados

| Herramienta de construcción pobre | % Tasa de incidencia | Hallazgos clave | Países destacados |
|---------------------------------------|----------------------|---|--|
| Sistema de Última Planificadora (LPS) | 40% | Mejora en PPC, planificación de la fiabilidad | Chile, Colombia, Brasil |
| Mapeo de Flujo de Valor (VSM) | 25% | Reducción de desperdicio y tiempo | Asia, Marruecos, contextos internacionales |
| 5S | 15% | Orden y limpieza in situ, reducción de pérdidas | Asia, América Latina |
| Kanban | 10% | Flujo continuo de materiales y tareas | Contextos internacionales diversos |
| BIM + Lean | 10% | Integración digital, mayor control | Reino Unido, Colombia |

Fuente: Autor.

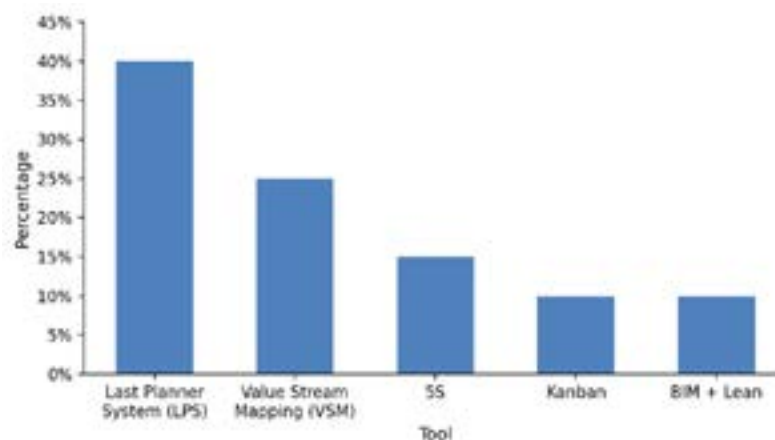


Figura 3. Frecuencia de uso de herramientas de construcción lean. Fuente: Autor.

Los porcentajes de frecuencia se derivaron de un análisis de los artículos incluidos en la revisión sistemática, basado en la herramienta Lean Construction aplicada, y se registró su presencia en las publicaciones revisadas. Los resultados reflejan la proporción relativa de cada herramienta dentro del número total de estudios empíricos analizados.



Sistema Último Planificador (LPS): mencionado en el 40% de los artículos, incluyendo (20), (21), (22), (49) y (47).

Mapeo de Flujo de Valor (VSM): identificado en el 25% de los artículos, como (5), (23), (24) y (45).

5S: se aplicó en el 15% de los estudios, incluyendo (25), (26) y (44).

Kanban: aparece en el 10% de las publicaciones, principalmente en estudios de flujo continuo como los de (26), (46) y (51).

BIM + Integración Lean: documentada en el 10% de los artículos, especialmente (12), (27) y (52).

Limitaciones globales en la implementación de la Construcción Enxuta

A nivel global, la implementación de la Construcción Enxuta se enfrenta a desafíos a nivel estructural, organizativo y cultural, que limitan su adaptación efectiva al sector de la construcción. Diversos estudios, como los de (28) y (29), han identificado las siguientes como las principales limitaciones: resistencia al cambio dentro del sector, que se basa en prácticas tradicionales, junto con la percepción generalizada de que la implementación Lean requiere una inversión financiera significativa; y la falta de políticas claras que promuevan la integración de esta filosofía en diversos proyectos, tanto públicos como privados.

Otra limitación identificada en diversas regiones del mundo es la falta de formación técnica que involucre a todos los actores del sector—tanto profesionales como trabajadores—lo que dificulta la adopción de herramientas clave como LPS, VSM y planificación colaborativa (29) (30). Esta situación se agrava por la falta de programas educativos estandarizados y formación formal en Construcción Enxuta, lo que contribuye a una curva de aprendizaje más lenta, retrasando así la implementación efectiva de estas metodologías en las obras.

En diversos contextos latinoamericanos, estudios como los de (52) muestran que la adopción de la Construcción Enxuta y la construcción industrializada (CI) aún está en sus primeras etapas, ya que estos estudios señalan que, aunque existe interés empresarial en aplicar los principios de la Construcción Enxuta, estos esfuerzos siguen siendo aislados y no se han institucionalizado ni incorporado a una estrategia empresarial integral, mientras que la fragmentación de la cadena de suministro y los compartimentos estructurales organizativos también representan barreras significativas para la integración efectiva de la Construcción Enxuta en el sector.

A nivel internacional, otro desafío recurrente son las limitaciones financieras, ya que existe la percepción generalizada de que implementar la Construcción Enxuta implica altos costes iniciales —en términos de formación, herramientas digitales y reorganización de procesos— lo que dificulta su adopción, especialmente entre pequeñas y medianas empresas (28) (30), dado que las empresas a menudo carecen de los recursos necesarios para sostener un plan de implementación por fases o para contratar consultores especializados en el sector.

Además, la falta de transparencia y un flujo eficiente de información dentro de las organizaciones también se identifica como una limitación significativa; En algunos casos, los actores clave en el





proceso de construcción retienen información crítica, o hay una falta de comunicación efectiva entre los niveles organizativos. Esto, a su vez, revela una falta de colaboración y confianza interna, dificultando la planificación conjunta y el control visual—aspectos fundamentales de la Construcción Enxuta (30)

Finalmente, no existen planes estratégicos estandarizados ni directrices prácticas a nivel nacional para promover la implementación de la Construcción Enxuta en la industria colombiana; A nivel institucional y de asociaciones comerciales, esto pone de manifiesto la ausencia de protocolos implementables y escalables, lo que dificulta las iniciativas actuales al convertirlas en casos aislados sin replicabilidad ni continuidad (28) (29).

Discusión de los resultados

La evidencia internacional, como la de (20) y (43), y estudios locales de (21) y (22), muestran que la Construcción Enxuta tiene un potencial significativo para aumentar la productividad en las obras, pero su implementación en Colombia requiere superar desafíos específicos. La literatura académica destaca que el uso aislado y fragmentado de herramientas de Construcción Enxuta, sin una estrategia institucional sólida, limita la obtención de beneficios duraderos y medibles (29) (53). En empresas medianas y grandes, las iniciativas de Lean Construction suelen ser impulsadas por mandos intermedios o proyectos puntuales, sin integrarse en la cultura de la organización ni en los procesos de planificación estratégica (53)

Esta situación se ilustra con estudios realizados en Colombia (52), que demuestran los beneficios de las herramientas de Construcción Enxuta para la planificación de proyectos, y (22), que documentan que la implementación de LPS en proyectos de ingeniería civil en Medellín resultó en mejoras significativas en el control de actividades y la coordinación entre equipos. Sin embargo, ambos estudios también coinciden en que la falta de estandarización y el bajo nivel de madurez institucional limitan la sostenibilidad de estos avances, reflejando una tendencia común en contextos latinoamericanos donde las iniciativas Lean se implementan de manera fragmentada y sin una estrategia organizativa sólida.

Aunque los resultados presentados se basan en tendencias internacionales, compararlas con el contexto colombiano revela brechas institucionales y culturales que explican la limitada adopción de la Construcción Enxuta en el país.

Además, existe una falta de formación estructurada y certificación en Construcción Enxuta aplicada a la industria de la construcción. Mientras que en países como Chile, Brasil y Perú las universidades y cámaras de comercio promueven eventos y formación en Construcción Enxuta, en Colombia la adopción académica aún está en pañales y no existe un currículo estandarizado que integre estas prácticas en los programas de grado (29)(54). Esta carencia educativa y técnica contrasta con los altos beneficios potenciales asociados a la implementación sistemática de LPS, VSM y planificación visual colaborativa.



Desde un punto de vista financiero, la percepción de altos costes iniciales limita la adopción entre las pequeñas y medianas empresas (PYMES), que constituyen la mayoría del sector nacional de la construcción (28). La falta de incentivos o subvenciones gubernamentales para prácticas innovadoras dificulta iniciativas más ambiciosas. En contraste, en países con políticas activas de modernización, se ha observado que el apoyo regulatorio acelera la adopción de la Construcción Enxuta.

Estudios como los citados en (30) muestran que la confianza y la transparencia dentro de las organizaciones son limitadas, lo que socava la planificación compartida y el control visual necesarios para implementar eficazmente la Construcción Esbelte. Sin canales de comunicación formales entre niveles jerárquicos, la identificación y resolución temprana de las restricciones se vuelve difícil, reduciendo así la capacidad de mejora continua y optimización del flujo de trabajo.

A pesar de estas barreras, la literatura académica y algunos proyectos piloto han demostrado que una aplicación sistemática de la Construcción Enxuta puede mejorar la planificación estratégica y la gestión de recursos financieros en las empresas colombianas. (55) describe un caso en el que Lean Construction contribuyó a la competitividad y eficiencia administrativa de una empresa constructora local al optimizar procesos financieros y estratégicos desde una perspectiva de Lean Construction.

Todo esto sugiere que Colombia necesita estrategias tecnológicas integradas para modernizar su sector de la construcción (56), aprovechando el hecho de que tiene un terreno fértil para avanzar en la Construcción Lean. Para lograrlo, se requiere una estrategia nacional que incluya: formación técnica estandarizada, proyectos piloto con apoyo institucional, directrices regulatorias y la difusión de historias de éxito. Asociaciones como Lean Construction Colombia, junto con universidades y asociaciones comerciales como Camacol, desempeñan un papel clave en liderar este esfuerzo. Solo así se puede transformar la productividad del sector mediante una implementación Lean sostenible adaptada al contexto local.

Conclusiones

La revisión demuestra que Lean Construction se ha consolidado como una alternativa sólida para transformar la gestión de proyectos en la industria de la construcción, no solo por los beneficios técnicos que ofrece, sino también por el cambio cultural y organizativo que impulsa dentro de las empresas. Su potencial va más allá de la reducción de residuos y la mejora del flujo de trabajo, ya que propone una visión sistémica donde la planificación colaborativa, la estandarización y la mejora continua se convierten en piedras angulares para generar valor a lo largo de toda la cadena de entrega del proyecto. Este estudio se basa en una perspectiva global, basándose en evidencia empírica y teórica reportada en diferentes regiones del mundo. Este enfoque nos permitió identificar patrones comunes en la relación entre Construcción Enxuta y productividad, más allá de las particularidades regionales, proporcionando una visión completa de su impacto en la eficiencia, la sostenibilidad y la gestión de proyectos. Desde esta perspectiva global, los hallazgos constituyen una base de conocimiento útil para guiar la adopción de la Construcción Enxuta en contextos emergentes como el de Colombia.





El análisis internacional confirma, en línea con los hallazgos de (12), (48) y (47), que la verdadera eficacia de este enfoque reside en su integración estratégica, más que en el uso aislado de herramientas. Cuando la Construcción Enxuta se institucionaliza, sus impactos se extienden tanto a la productividad como a la sostenibilidad, fomentando organizaciones más resilientes y competitivas frente a los desafíos globales. Esta perspectiva pone de relieve la necesidad de que Colombia avance hacia un cambio estructural que implique formación especializada, coordinación entre partes interesadas y mayor apertura a la innovación, superando la dependencia de prácticas tradicionales que han limitado la eficiencia del sector.

En este sentido, la experiencia de otros países demuestra que la transición hacia un modelo Lean Construction depende no solo de las capacidades técnicas, sino también de la disposición al aprendizaje organizacional, la transparencia en la gestión y el compromiso en todos los niveles jerárquicos. Colombia está bien posicionada para aprovechar estas lecciones, siempre que consolide políticas, alianzas institucionales y estrategias empresariales que permitan una adopción progresiva y sostenible de la filosofía Lean Construction.

La contribución específica de este artículo al sector de la construcción en Colombia es identificar, mediante una revisión sistemática, las principales barreras que limitan la implementación de la Construcción Enxuta en el país (resistencia cultural, falta de formación técnica, costes iniciales y fragmentación organizativa), y contrastarlas con experiencias internacionales exitosas. De este modo, se proporciona un marco crítico que no solo describe el estado actual de las cosas en Colombia, sino que también propone directrices concretas para avanzar hacia una adopción progresiva y sostenible de la Construcción Lean, contribuyendo a la mejora de los procesos productivos, la gestión organizativa y la formulación de políticas en el sector.

Como agenda futura para Colombia, el estudio propone fortalecer los programas académicos y de formación en Construcción Lean, desarrollar directrices nacionales para estandarizar su aplicación en diferentes tipos de proyectos e implementar incentivos financieros para animar a las empresas a adoptar esta filosofía. En conjunto, estas acciones acelerarían la transición hacia un sector más productivo, innovador y sostenible.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Álvaro José Quintero Rojas. **Curación de datos:** Álvaro José Quintero Rojas. **Análisis formal:** Álvaro José Quintero Rojas. **Investigación:** Álvaro José Quintero Rojas. **Metodología:** Sandra Liliana Cano Moya. **Dirección de Proyecto:** Romel Jesús Gallardo Amaya. **Recursos:** Álvaro José Quintero Rojas. **Software:** Álvaro José Quintero Rojas. **Supervisión:** Romel Jesús Gallardo Amaya. **Validación:** Sandra Liliana Cano Moya. **Redacción - Borrador Original - Elaboración:** Álvaro José Quintero Rojas. **Revisión y Edición - Elaboración:** Sandra Liliana Cano Moya.

Financiación: No declarada.

Conflicto de Intereses: No declarado. **Consideraciones Éticas:** No declarado.



Referencias

1. Barbosa F, Woetzel J, Mischke J, Ribeirinho MJ, Sridhar M, Parsons M, et al. Reinventing construction: A route to higher productivity. McKinsey Global Institute. 2017. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/~ /media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf>
2. Sveikauskas L, Rowe S, Mildenerger J, Price J, Young A. Productivity growth in construction. *J Constr Eng Manag.* 2016;142(10).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001138](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001138)
3. DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Indicadores del sector construcción - IV Trimestre 2024. DANE. 2024. Disponible en:
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion>
4. Aslam M, Gao Z, Smith G. Framework for selection of lean construction tools based on lean objectives and functionalities. *Int J Constr Manag.* 2020;22(8):1559-1570.
<https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1729933>
5. Du J, Zhang J, Castro-Lacouture D, Hu Y. Lean manufacturing applications in prefabricated construction projects. *Autom Constr.* 2023;150:104790.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104790>
6. Li CZ, Tam VWY, Hu M, Zhou Y. Lean construction management: A catalyst for evaluating and enhancing prefabricated building project performance in China. *J Build Eng.* 2024;94:109930.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109930>
7. Ortega J, Mesa HA, Alarcón LF. The interrelationship between barriers impeding the adoption of off-site construction in developing countries: The case of Chile. *J Build Eng.* 2023;73:106824.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106824>
8. Awad T, Guardiola J, Fraíz D. Sustainable construction: Improving productivity through lean construction. *Sustainability.* 2021;13(24):13877.
<https://doi.org/10.3390/su132413877>
9. Schimanski CP, Pradhan NL, Chaltsev D, Monizza GP, Matt DT. Integrating BIM with lean construction approach: Functional requirements and production management software. *Autom Constr.* 2021;132:103969.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103969>
10. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
11. Goshu AT, Koya PR. Derivation of inflection points of nonlinear regression curves - implications to statistics. *Am J Theor Appl Stat.* 2013;2(6):268-272.
<https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20130206.25>
12. Garcés G, Forcael E, Osorio C, Castañeda K, Sánchez O. Systematic review of lean construction: an approach to sustainability and efficiency in construction management. *J Infrastruct Preserv Resil.* 2025;6(1):6.





<https://doi.org/10.1186/s43065-025-00119-1>

13. Castañeda K, Sánchez O, Peña CA, Herrera RF, Mejía G. BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections. *Autom Constr.* 2025;176:106247.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106247>

14. Blandín Figueroa F. La metodología Lean Construction: una revisión sistemática a la bibliografía 2019-2023. *South Florida J Dev.* 2023;4(6):2413-2431.

<https://doi.org/10.46932/sfjdv4n6-016>

15. Koskela L. Application of the new production philosophy to construction. Technical Report CIFE 72, Stanford University. 1992. Disponible en: <https://stacks.stanford.edu/file/druid:kh328xt3298/TR072.pdf>

16. Koskela L, Howell G, Ballard G, Tommelein I. The foundations of lean construction. *Design and Construction: Building in Value*, Butterworth-Heinemann. 2002.

<https://doi.org/10.4324/9780080491080-16>

17. Aslam M, Gao Z, Smith G. Integrated implementation of Virtual Design and Construction (VDC) and lean project delivery system (LPDS). *J Build Eng.* 2022;39:102252.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102252>

18. Meshref AN, Ahmed EAF, Ibrahim AE. Construction waste reduction in the life cycle of industrial projects. *J Build Eng.* 2023;67:106302.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106302>

19. Yücenur GN, Şenol K. Sequential SWARA and fuzzy VIKOR methods in elimination of waste and creation of lean construction. *J Build Eng.* 2021;44:103196.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103196>

20. Lagos CI, Herrera RF, Mac Cawley AF, Alarcón LF. Predicting construction schedule performance with Last Planner System and machine learning. *Autom Constr.* 2024;167:105716.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105716>

21. Soman RK, Molina-Solana M. Automating look-ahead schedule generation for construction using linked data-based constraint detection. *Autom Constr.* 2022;135:104069.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104069>

22. Castiblanco FM, Castiblanco IA, Cruz JP. Qualitative analysis of lean tools in the construction sector in Colombia. *Proc 27th Annual Conf Int Group Lean Construction (IGLC)*. 2019.

<https://doi.org/10.24928/2019/0185>

23. Sivashanmugam S, Rodriguez S, Pour Rahimian F, Elghaish F, Dawood N. Enhancing information standards for automated construction waste quantification and classification. *Autom Constr.* 2023;152:104898.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104898>

24. Wei Y, Lei Z, Altaf MS. Simulation-based comparison of push- and pull-based planning in panelized construction. *Autom Constr.* 2024;158:105228.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105228>





25. Albertini F, Gomes LP, Grondona AEB, Caetano MO. Environmental performance assessment in construction sites: Data envelopment analysis and Tobit model. *J Build Eng*. 2021;44:102994.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102994>

26. Wang P, Wu P, Chi HL, Li X. Adopting lean thinking in virtual reality-based personalized operation training with value stream mapping. *Autom Constr*. 2020;119:103355.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103355>

27. Jiang F, Ma L, Broyd T, Chen K. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Autom Constr*. 2021;130:103838

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>

28. Demirkesen S, Tezel A. Investigating major challenges for Industry 4.0 adoption among construction companies through RII and midpoint analysis. *Eng Constr Archit Manag*. 2021;29(3):1350-1385

<https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1059>

29. Wuni IY, Shen GQ. Critical barriers to the adoption of integrated digital delivery in the Hong Kong construction industry. *J Build Eng*. 2024;84:108474.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108474>

30. Elkhayat Y, Chen Q. Technology adoption in construction industry (1999-2023): Science mapping and thematic analysis. *Autom Constr*. 2024;162:105491.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105491>

31. Kassem M, Succar B. Measuring and benchmarking excavator productivity in infrastructure projects. *Autom Constr*. 2021;121:103532.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103532>

32. Chacón R, Posada H, Ramone C. Digital twins of building construction processes: A case study of a reinforced concrete building. *J Build Eng*. 2024;82:108522.

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522>

33. Koskela L. An exploration towards a production theory and its application to construction [dissertation]. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland; 2000. 296 p. (VTT Publications; 408). ISBN: 951-38-5565-1. Disponible en:

<https://publications.vtt.fi/pdf/publications/2000/P408.pdf>

34. Ivina D, Olsson NOE. Lean construction principles and railway maintenance planning. En: Proc. 28th Annual Conf. Int. Group for Lean Construction (IGLC28); 2020; Berkeley, EE. UU. p. 1105-1116.

<https://doi.org/10.24928/2020/0063>

35. Rao AS, Chand MR, Nguyen AQ. Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Autom Constr*. 2022;136:104099.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>

36. Zamani V, Yavari E, Taghaddos H. A science mapping perspective on discrete event simulation applications in construction project management. *Autom Constr*. 2024;162:105625.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105625>





37. Sadatnya A, Alizadehsalehi S, Park S. Machine learning for construction equipment productivity prediction using daily time-lapse images. *Autom Constr.* 2023;155:104891.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104891>

38. Pfitzner F, Braun A, Borrmann A. From data to knowledge: Construction process analysis through continuous image capture. *Autom Constr.* 2024;162:105451.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105451>

39. Ban J, Moon S, Kim M. Feasibility of virtual-reality-generated synthetic data for automated construction productivity monitoring. *Autom Constr.* 2025;172:106432.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106432>

40. Jiang C, Li X, Lin JR, Liu M. Adaptive resource flow control to optimize construction work and cash flow using online deep reinforcement learning. *Autom Constr.* 2023;150:104817.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104817>

41. Chen J, Man F, Han S, Kim M, Du Q, Chi HL. Integrating lean thinking into crane operator training with a digital coach to enhance safety and productivity. *Autom Constr.* 2025;178:106430.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106430>

42. Yeung T, Martinez JG, Shen J. Integrating digital twins and agent-based simulation to support adaptive production planning in industrialized construction. *Autom Constr.* 2025;174:106550.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106550>

43. Barkokebas B, Martinez Rodriguez P, Bouferguene A, Hamzeh F, Al-Hussein M. Digitalization-based process improvement and decision-making in offsite construction. *Autom Constr.* 2023;155:105052.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105052>

44. Alkaissy M, Arashpour M, Ashuri B, Bai Y. Simulation-based analysis of continuous improvement of occupational health and safety in construction. *Autom Constr.* 2022;134:104058.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104058>

45. Sivashanmugam S, Rodriguez S, Farida I, Charef R. Integrated semantic marking in BIM for construction waste quantification and optimization. *Autom Constr.* 2024;165:105842.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105842>

46. Martínez E, Pfister L. Benefits and limitations of using low-code development to support digitalization in construction. *Autom Constr.* 2023;155:104909.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104909>

47. Khalife S, Hamzeh F. Using simulation to evaluate value alignment and compliance in lean collaborative contracting. *Autom Constr.* 2024;162:105450.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105450>

48. Tomczak M, Jaśkowski P. Harmonizing construction processes in repetitive construction projects with learning-based production rates. *Autom Constr.* 2022;137:104266.

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104266>





49. Taghaddos M, Hermann U, AbouRizk S, Mohamed Y. Multimode hybrid simulation and optimization for sub-area scheduling in industrial construction. *Autom Constr.* 2021;122:103616.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103616>
50. Qi B, Razkenari M, Costin A, Kibert C, Fu M. A systematic review of emerging technologies in industrialized construction. *J Build Eng.* 2021;39:102265.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102265>
51. Aristizábal-Monsalve P, Vásquez-Hernández A. Perceptions on sustainability rating systems processes and their combined application with BIM. *J Build Eng.* 2022;46:103627.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103627>
52. Lozano F, Payá-Zaforteza I, Yepes V. Integration of BIM and value model for sustainability assessment of a bridge infrastructure project. *Autom Constr.* 2023;155:104935.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104935>
53. Abideen DK, Yunusa-Kaltungo A, Manu P. Key information requirements for the integration of construction information models in operation and maintenance. *J Build Eng.* 2024;85:111445.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111445>
54. Ikudayisi AE, Chan AP, Darko A. Integrated practices in the architecture, engineering and construction industry: Current level and barriers to BIM-lean integration. *J Build Eng.* 2023;68:106788.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106788>
55. Lu W, Chen J, Webster C. Identifying learning effects in modular construction manufacturing. *Autom Constr.* 2023;154:105010.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105010>
56. Mowafy N, Ismaeil E, Abdelraouf A. Parametric BIM-based life cycle assessment framework for optimal sustainable design. *J Build Eng.* 2023;70:106898.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106898>
57. Chowdhury M, Hosseini R, Pashootan A. Comprehensive analysis of BIM adoption: From a limited focus to a holistic understanding. *Autom Constr.* 2024;160:105301.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105301>
58. Zhang X, Li H, Cao Y. Automated component delivery management under uncertainty for prefabricated construction using BIM. *Autom Constr.* 2024;161:105388.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105388>
59. Ahn SJ, Kim H, Choi B. Integration of prefabricated and in-situ construction schedules using BIM and lean principles. *Autom Constr.* 2022;138:104201.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104201>
60. Peiris A, Hui FKP, Duffield C, Ngo T. Production scheduling in modular construction: Metaheuristics and future directions. *Autom Constr.* 2023;150:104851.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104851>