

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CONTRIBUCION DE LEAN CONSTRUCTION PARA
ALCANZAR LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, que presentan los
bachilleres:

Alejandro Deville del Águila
Gian Pedro Gallo Rentería

Asesor: Ramzy Kahhat Abedrabbo, Ph.D.

Lima, Noviembre del 2017



RESUMEN

Actualmente, en el Perú, existe un déficit de 1.8 millones de viviendas en el Perú, por lo que se espera que, para satisfacer esta demanda, se lleven a cabo numerosos proyectos de edificaciones. Especialmente los de vivienda masiva, los cuales son muy atractivos para los niveles socioeconómicos B, C y D quienes constituyen el 77% de la población. La construcción de viviendas para satisfacer esta demanda requerirá de 88 millones de GJ de energía y emitirá 12 millones de toneladas equivalentes de CO₂. Por ende, es de gran importancia analizar herramientas que permitan reducir al mínimo posible los impactos ambientales de este rubro económico.

En este contexto, la presente investigación busca evaluar y cuantificar la contribución de la filosofía Lean para alcanzar la construcción sostenible. Para lograr esto, se realizó un análisis comparativo de la simulación de la construcción de un proyecto de vivienda masiva a través de dos metodologías. La primera de ellas asociada al sistema de construcción tradicional, mientras que la segunda, al sistema de construcción *Lean*. Posteriormente, se calcularon las diferencias en el consumo energético, generación de desperdicios sólidos y duración de actividades. Finalmente, se obtuvieron los impactos ambientales producto de estas variaciones mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Se demostró que *Lean Construction* optimiza la ejecución de la construcción ya que permite reducir la duración del cronograma, y la cantidad de mano de obra empleada. Asimismo, se observó que dicha metodología permite reducir entre 4% y 8% los impactos ambientales por producción de materiales. Finalmente, a pesar de que se genera mayores impactos ambientales por envío de materiales, se obtuvo que emplear la filosofía *Lean* contribuye de manera positiva al desarrollo sostenible de la actividad constructiva.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Contribución de *Lean Construction* para alcanzar la construcción sostenible"
Área : Medio Ambiente y Recursos Hídricos
Asesor : Ramzy Kahhat, Ph.D.
Alumnos : GIAN PEDRO GALLO RENTERIA
ALEJANDRO DEVILLE DEL AGUILA
Código : 2010.0754.412
2010.0526.412
Tema N° : # 86
Fecha : Lima, 15 de febrero de 2017



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El déficit de viviendas en el Perú es de 1.8 millones de unidades, las cuales son demandadas principalmente por los sectores NSE B, C y D, que constituyen el 77% total de la población (Apeim 2015). Para satisfacer esta demanda, las empresas inmobiliarias ofrecen un tipo de vivienda masiva que son más económicas y que cuentan con las características solicitadas por estos sectores de la población.

Los edificios de vivienda masiva utilizan el sistema estructural conocido como ductilidad limitada (EDL), o sistema de muros estructurales. Este tipo de estructuras tienen un bajo costo de producción y, dependiendo del método constructivo, los tiempos de ejecución pueden ser bastante veloces. Por estas razones, este tipo de viviendas continuarán siendo construidas a gran escala. Además, la metodología *Lean Construction* es usada por algunas empresas vinculadas a este rubro para reducir los costos de la construcción y tiempo de ejecución.

Por otro lado, la construcción es un rubro que genera un alto consumo de materias primas y energía primaria y está asociado a importantes impactos ambientales, tales como, emisión de material particulado, gases con efecto invernadero, ruido, entre otros. Sin embargo, existen distintas publicaciones que evidencian que implementar la nueva filosofía de producción, *Lean Construction*, es capaz de reducir la generación de estos aspectos ambientales.

Considerando la gran cantidad de proyectos de vivienda masiva que serán construidos en los próximos años es importante conocer el impacto al ambiente de la aplicación de una metodología de diseño, planeamiento y ejecución que busca la eficiencia en los procesos. Es por ello que este proyecto de investigación busca evaluar y cuantificar el aporte de *Lean Construction* para alcanzar una construcción sostenible.

ANTECEDENTES

Diferentes estudios señalan que existe un relación directa entre la implementación de la filosofía *Lean* y sostenibilidad. Dues et al (2013), explica que la filosofía de producción *Lean* es compatible con el concepto de producción sostenible, ya que

BEA

Q

J

ambos tienen conceptos en común, como el de identificar y reducir desperdicios, reducir los tiempos de espera, incentivar la búsqueda de mejores prácticas y divulgación de ellas.

Por otro lado, Bergmiller et al (2009), explica que existe una sinergia entre *Lean* y sostenibilidad. Esta sinergia se fundamenta en que ambos conceptos buscan la participación activa de todos los miembros de una organización, para la implementación y fomentación de la identificación y métodos de reducción de desperdicios; y la búsqueda de la mejora continua en los procesos productivos. Asimismo, los autores evidenciaron que aquellas empresas que implementaron en sus procesos de producción objetivos de reducción de desperdicios y sistemas de gestión sostenibles obtuvieron mejor calificación en la evaluación de Shingo Prize, que mide la excelencia y calidad de procesos de manufactura en Estados Unidos de América.

Por otro lado, Bhamu et al (2014) demostró que al implementar los conceptos de *Lean manufacturing* se genera una reducción de costos en los procesos productivos, debido al aumento de calidad y de productividad. Asimismo, menciona que se produce una reducción en la generación de desperdicios, entre ellos, trabajos rehechos y desperdicios materiales con defectos o con falta de calidad.

OBJETIVO

El objetivo de la presente investigación es evaluar y cuantificar la contribución de la filosofía *Lean* para alcanzar la construcción sostenible, teniendo como caso de estudio un proyecto de edificaciones de vivienda multifamiliar en la ciudad de Lima.

PLAN DE TRABAJO

Para desarrollar la investigación, se seguirá la siguiente secuencia:

1. Revisión del estado del arte con respecto al tema propuesto
2. Selección del proyecto y obtención de información técnica (por ejemplo, plano de ubicación, planos estructurales, planos de arquitectura)
3. Obtención de los metrados y porcentajes de desperdicio de materiales
4. Planeamiento de los procesos constructivos y simulación de la construcción usando las dos metodologías: (1) *Lean Construction*, y (2) Método de construcción tradicional
5. Comparación de las simulaciones
6. Análisis de ciclo de vida y evaluación de impactos ambientales utilizando el software SimaPro
7. Análisis y comparación de los resultados
8. Conclusiones y comprobación de la hipótesis
9. Redacción del manuscrito

NOTA

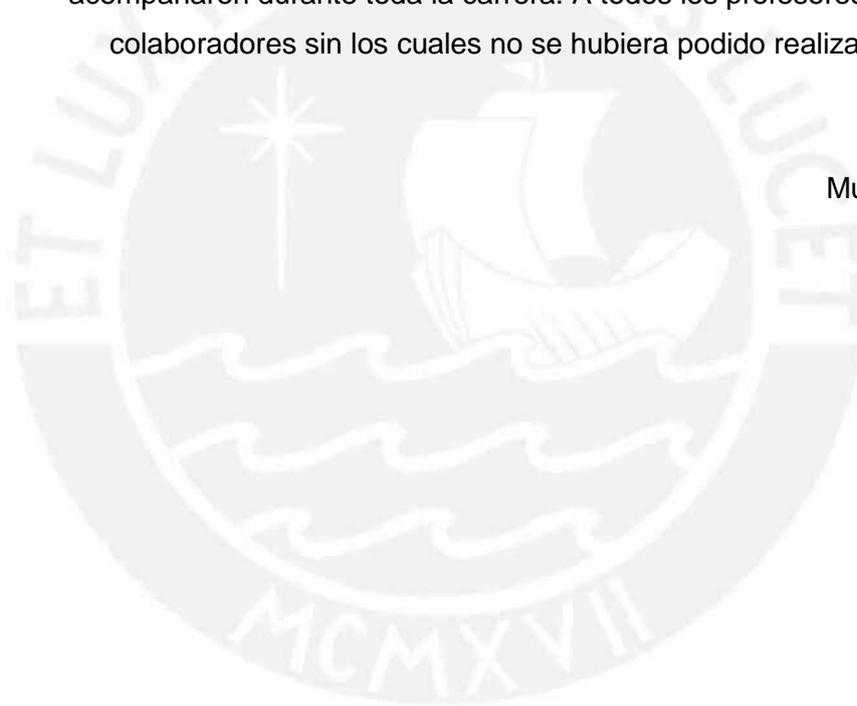
Extensión máxima: 100 páginas.

17 F. Kallat



A nuestros padres, por el apoyo incondicional que nos dieron en toda la etapa de formación. A nuestros hermanos, quienes siempre estuvieron ahí en los momentos difíciles para darnos el impulso necesario. A nuestro asesor, Ramzy Kahhat, quien nos apoyó y creyó en nosotros. A nuestros amigos cercanos quienes nos acompañaron durante toda la carrera. A todos los profesores, ingenieros y colaboradores sin los cuales no se hubiera podido realizar este trabajo.

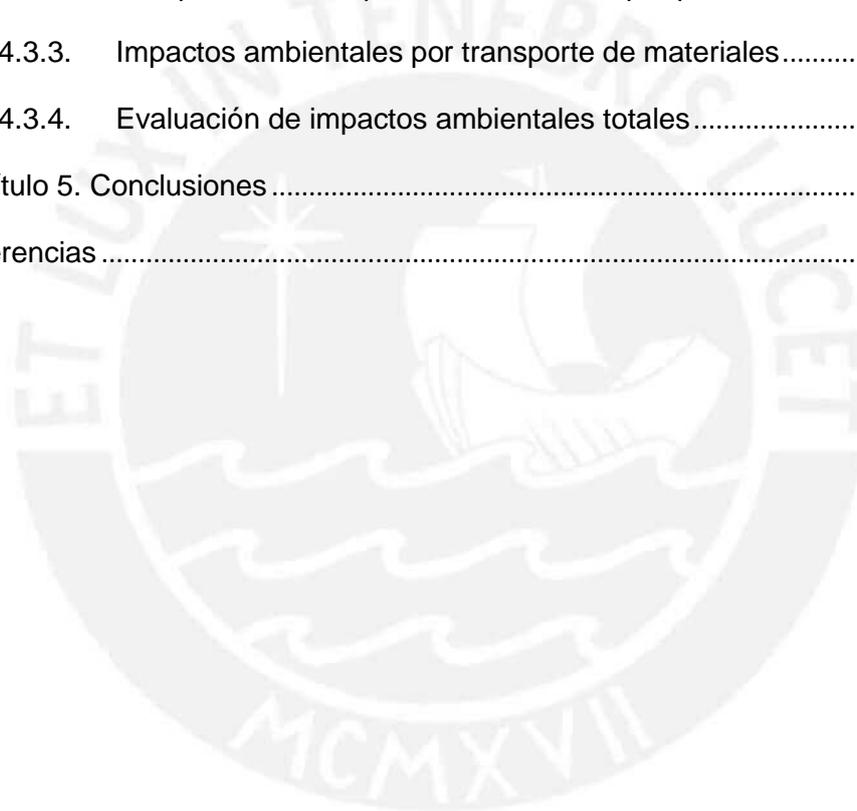
Muchas gracias.



Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Medio ambiente y construcción.....	2
1.2. Estado actual del medio ambiente	3
1.3. Realidad Peruana.....	5
1.3.1. Déficit de Infraestructura y Viviendas	5
1.3.2. Demanda de viviendas en Lima.....	7
Capítulo 2. Estado del arte	9
2.1. Lean Construction	9
2.1.1. Flujos y procesos de conversión	11
2.1.2. Lean Project Delivery System (LPDS).....	12
2.2 Sistema de producción eficiente y efectivo	16
2.3 Relación entre Sostenibilidad y Lean.....	17
2.4 Implementación de construcción sostenible	22
Capítulo 3. Metodología	25
3.1. Objetivos e hipótesis.....	25
3.2. Alcance	25
3.3. Marco metodológico.....	25
3.4. Análisis de impactos ambientales.....	27
3.4.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	27
3.4.2. Software para desarrollo de ACV	28
3.4.4. ACV de transporte de materiales.....	31
3.5. Simulación de la ejecución del proyecto.....	33
3.5.1. Simulación del proyecto según filosofía de producción tradicional.....	34
3.5.2 Simulación del proyecto según filosofía Lean Construction.....	35
3.5.3. Comparación entre metodologías	37
3.6. Caso de estudio.....	37
3.6.1. Ubicación del proyecto	39

3.7. Consideraciones generales	40
Capítulo 4. Resultados	41
4.1. Resultados de la simulación de los métodos constructivos.....	41
4.1.1. Simulación según Lean	41
4.1.1. Simulación según metodología tradicional.....	50
4.2. Comparación de resultados.....	59
4.3. Efectos en el medio ambiente	60
4.3.1. Impactos ambientales por producción de materiales	60
4.3.2. Comparativo de impactos ambientales por producción de materiales	63
4.3.3. Impactos ambientales por transporte de materiales.....	64
4.3.4. Evaluación de impactos ambientales totales.....	67
Capítulo 5. Conclusiones	70
Referencias	73



Capítulo 1. Introducción

El déficit de viviendas en el Perú se estima en 1.8 millones de unidades (Apeim 2015), las cuales son demandadas por sectores de la población que pertenecen a los niveles socioeconómicos B, C y D, quienes constituyen el 77% total de la población. Para satisfacer esta demanda, las empresas inmobiliarias ofrecen una vivienda masiva económica que satisface las necesidades básicas de los clientes. Además, el estado peruano, mediante programas como el Fondo Mivivienda ofrecen financiamiento para la adquisición, mejoramiento y construcción de viviendas de los sectores C y D (Fondo Mivivienda S.A, 2017).

Estos proyectos de vivienda masiva, usualmente son construidos con el sistema estructural denominado edificio de ductilidad limitada (EDL), los cuales resultan muy atractivos para satisfacer el déficit de viviendas ya que la construcción de estos se caracteriza por ser de rápida ejecución y de bajos costos de producción.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que la construcción de edificaciones es un rubro con alto consumo de materias primas, energía primaria y generación de impactos ambientales. Brown (2001), menciona que los edificios de vivienda generan el 50% de los residuos sólidos totales a nivel global; asimismo, Hawken (1999) estima que en la construcción se utiliza entre el 45 y 50% de los recursos agua y energía eléctrica consumidos por el hombre. Estos conceptos permiten inferir que los proyectos destinados a satisfacer la demanda de 1.8 millones de unidades de vivienda representan, además de una posibilidad de bienestar para la población, una gran fuente de generación de impactos ambientales.

Frente a esta problemática, se presenta la siguiente investigación, la cual busca contribuir hacia un desarrollo sostenible del país, y específicamente, del rubro de construcción. Para ello, se buscará demostrar que se pueden aminorar la cantidad e intensidad de impactos ambientales a través de una herramienta de gestión de la construcción conocida como *Lean Construction*.

Lean Construction, fue originalmente concebida como una metodología para reducir costos operativos y maximizar las utilidades de un proyecto de construcción. Sin embargo, autores como Bergmiller (2009), Dues (2013) y Bhamu (2014) consideran los conceptos de sostenibilidad y Lean son compatibles y que se puede generar una sinergia entre ambos. En la presente investigación se buscará demostrar que Lean Construction contribuye positivamente a alcanzar la construcción sostenible.

1.1. Medio ambiente y construcción

El rubro de la construcción ha mejorado la calidad de vida de las personas, permitiéndoles vivir en ciudades, trasladarse en vías pavimentadas, tener acceso a servicios básicos de agua potable, desagüe y energía eléctrica, de modo que actualmente la sociedad depende en gran medida de la infraestructura ejecutada por esta industria. Sin embargo, a este rubro se le atribuye cerca del 50% del consumo de los recursos naturales, lo cual la convierte en una de las industrias menos sostenibles (Hawken. 1999). Además, se le atribuye a la construcción de edificios cerca del 50% de emisiones de diferentes impactos ambientales (Brown, 2001).

En la Tabla 1.1 se muestra la estimación del consumo de recursos naturales en el rubro de la construcción a nivel mundial. Por otro lado, en la Tabla 1.2 se observa la estimación de la contaminación global atribuida a los edificios a lo largo de su ciclo de vida. A través de estas tablas, podemos observar la importancia del rubro de la construcción ya que se observa que aproximadamente el 50% de los recursos hídricos y energía a nivel global son destinadas a la industria; debe de tomarse en cuenta también, que el 80% de los campos de cultivo desplazados, se deben a la construcción. Además, se observa que el 50% de los gases de efecto invernadero (la mayor cantidad ocurre en la fase de uso), generación de residuos sólidos y disminución de la capa de ozono a nivel global provienen de edificaciones.

Tabla 1.1. Estimación del uso de recursos naturales en la construcción a nivel global (Adaptada de Hawken, 1999)

Recurso	% usado en la construcción
Energía	45 - 50%
Agua	50%
Materiales para edificios y carreteras	60%
Tierra de agricultura desplazada por la construcción	80%
Productos de madera usados para la construcción	60%
Destrucción de la selva tropical indirecto	25%

Tabla 1.2. Estimación de la contaminación global atribuida a los edificios a lo largo de su ciclo de vida (Adaptada de Brown, 2001)

Contaminación	%
Calidad del aire en la ciudad	23%
Gases de efecto invernadero	50%
Contaminación del agua potable	40%
Residuos sólidos	50%
Disminución del ozono	50%

1.2. Estado actual del medio ambiente

En los últimos 100 años la Tierra ha aumentado su temperatura promedio en 0.5 °C. Esto es producto del aumento en la concentración de gases con efecto invernadero producido por actividades humanas (Lenzen et al, 2002). El principal de estos gases es el dióxido de carbono (CO₂) que es producido en la combustión de combustibles fósiles para producir energía.

Asimismo, en el caso de la construcción, uno de los materiales representativos es el cemento, ya que el aumento de su producción en un periodo de tiempo está directamente relacionado con el aumento de la actividad en el sector. Es decir, la actividad constructiva de un país está relacionada directamente con la producción de cemento. Las emisiones directas de CO₂ en la producción del cemento provienen de la combustión de combustibles fósiles y de la calcinación de la caliza; e indirectamente, de la producción de energía eléctrica a través de combustibles fósiles. De manera que, se produce aproximadamente 810 kg de CO₂ eq por tonelada producida de cemento (Deborah N. Huntzinger, 2009).

En la Figura 1.1, se puede observar la cantidad aproximada, de emisiones de CO₂ eq por la producción de cemento en el Perú, entre los años 2006 y 2012. Este gráfico fue elaborado utilizando información de la producción de cemento entre dichos años (INEI, 2012) y multiplicándolos por los kg de CO₂ eq producidos por tonelada de cemento.

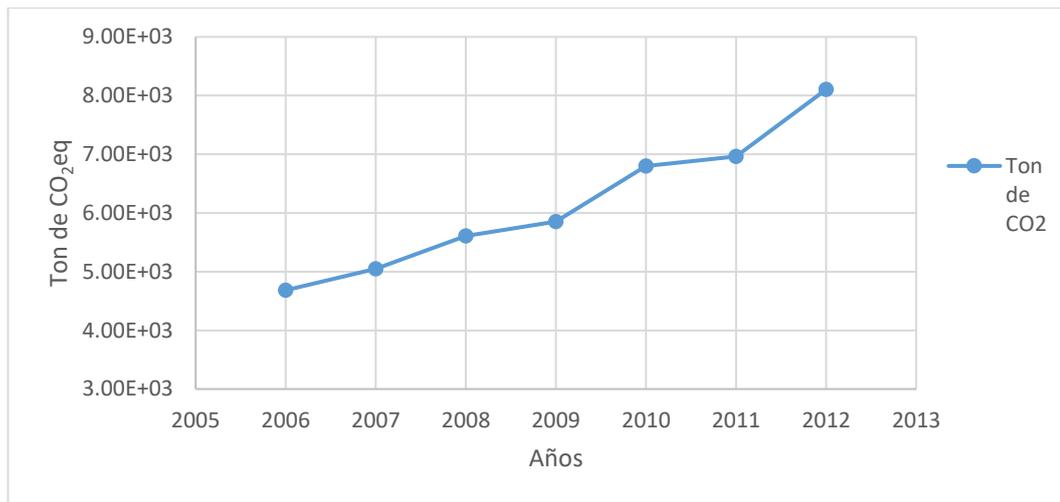


Figura 1.1. Toneladas de CO₂ eq aproximadas por la producción de cemento en el Perú (elaboración propia)

Por otro lado, la industria de la construcción es una gran consumidora de recursos, que provienen de distintos medios naturales o proveedores. A pesar de que los productos de esta industria tienen un prolongado tiempo de vida (por ejemplo, las viviendas tienen un tiempo de vida de 50 años) al ser demolidos generan una gran cantidad de residuos sólidos.

Los tipos de insumos materiales más utilizados en el rubro son arena y gravilla cuyos impactos ambientales principales son: pérdida de hábitat y ecosistemas, daños al paisaje, generación de partículas mecánicas, erosión de la tierra y alto tránsito de vehículos de carga pesada por zonas pobladas (Willmott Dixon, 2010).

Asimismo, el consumo de del agua y energía en el ciclo de vida de una vivienda, tanto en la fase de construcción como de uso, es cada vez mayor. Se estima que alrededor de 6 millones de litros de agua son necesarios para construir una vivienda, teniendo en consideración el agua necesaria para la producción industrial de los materiales, consumo de agua durante la etapa constructiva y el agua requerida para los sistemas de generación de energía eléctrica (McCormack et al, 2007)

1.3. Realidad Peruana

1.3.1. Déficit de Infraestructura y Viviendas

Actualmente, el Perú se encuentra con una demanda muy grande de viviendas para satisfacer las necesidades de la población. Actualmente en Lima, las autoconstrucciones y construcciones improvisadas con materiales de baja calidad y poca o ninguna orientación técnica, son muy comunes debido a la migración masiva entre las décadas de 1990 y 2000. La situación contribuyó a un aumento de viviendas que no cumplen con la normativa técnica. En adición a esto, al ser viviendas mal ubicadas, en lugares de difícil acceso; por ejemplo, en laderas de cerros, no cuentan con servicios de agua potable y desagüe, ni con el tamaño adecuado para la cantidad de personas que la habitan, por lo que la calidad de vida es deficiente.

El Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI), define déficit habitacional como el conjunto de requerimientos que tiene la población para contar con una vivienda digna. Estos requerimientos pueden ser de diferente tipo como: demanda de los hogares que aspiran a adquirir nuevas viviendas, reemplazar o reponer las viviendas ya existentes que no cuentan con las condiciones mínimas para ser consideradas como viviendas dignas, mejoramiento de viviendas que carecen de una estructura material o espacial adecuada, así como también, viviendas que no tengan acceso a los servicios básicos (INEI, 2007). De esta manera, con datos del censo realizado en 2007, el Perú cuenta con un déficit habitacional de 1, 860,692 viviendas (INEI, 2007). Este valor se calcula realizando la suma de los déficits cuantitativos y cualitativos respectivamente.

Se define como déficit cuantitativo la cantidad de viviendas necesarias para que el universo de hogares tenga acceso a vivienda (Fondo Mivivienda, 2006). La Figura 1.2. esquematiza los conceptos tomados en cuenta para el cálculo del déficit cuantitativo.

En cuanto al déficit cualitativo se consideran a las viviendas que se encuentran por debajo de estándares o criterios mínimos preestablecidos. Se consideran tres criterios: disponibilidad de servicios públicos (agua, luz y eliminación de excretas), calidad de materiales de vivienda (piso, paredes y techo) y el grado de hacinamiento (cantidad de personas que ocupan un determinado espacio) (Fondo Mivivienda, 2006). De la misma manera, la Figura 1.3 ilustra las consideraciones para el cálculo del déficit cualitativo.



Figura 1.2. Esquema de cálculo de déficit cuantitativo (adaptado de INEI, 2007)

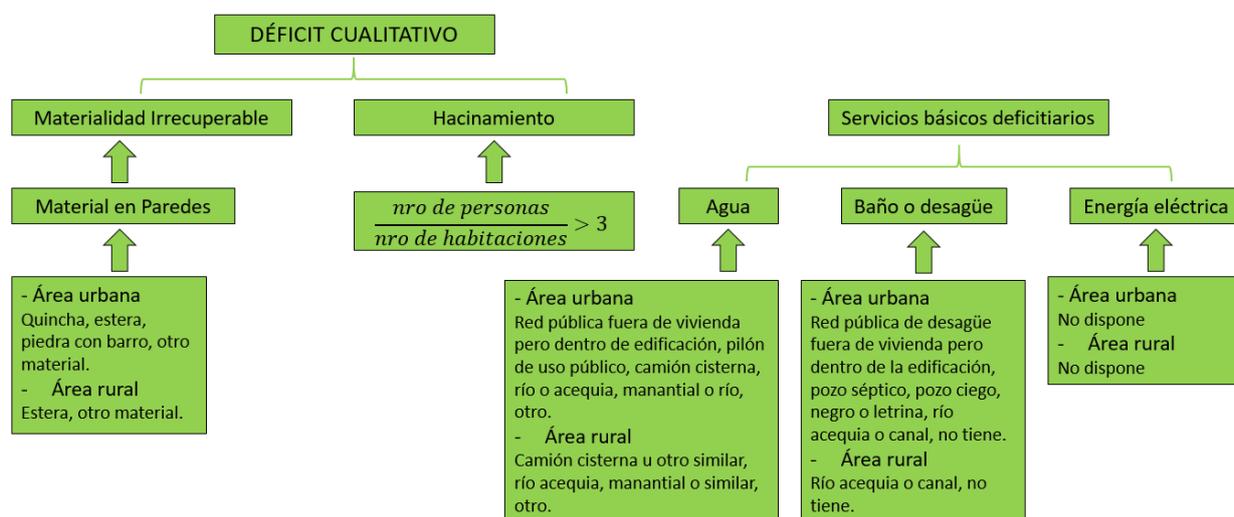


Figura 1.3. Esquema de cálculo de déficit (adaptado de INEI, 2007)

Según estas definiciones, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 1.3. En esta se observa que el déficit cualitativo contribuye el mayor aporte al déficit habitacional con el 79.1% del total. Con esta información se observa que el déficit actual se debe mayormente a viviendas hacinadas, con materiales no adecuados y con insuficiente acceso a los servicios básicos de agua, desagüe y energía eléctrica.

Tabla 1.3. Distribución de Déficit Habitacional por tipo (adaptado de INEI, 2007)

Área de Residencia	Déficit Habitacional							
	Total	Cuantitativo			Cualitativo			
		Total	Déficit Tradicional	Viviendas no adecuadas	Total	Material Irrecuperable (en paredes)	Viviendas Hacinadas	Servicios Básicos deficitarios
TOTAL	1,860,692	389,745	353,943	35,802	1,470,947	215,636	734,489	520,822
Urbana	1,207,610	375,699	341,761	33,938	831,911	187,118	408,006	236,787
Rural	653,082	14,046	12,182	1,864	639,036	28,518	326,483	284,035

La Tabla 1.3 también demuestra cómo el déficit en la zona urbana es mucho mayor a la zona rural, equivaliendo el 64.9% del total. Esta situación tiene como mayor síntoma el problema presente en el departamento de Lima, donde se tiene un déficit habitacional de 444002 viviendas (INEI, 2007), equivalente al 29.2% del total.

1.3.2. Demanda de viviendas en Lima

La migración hacia la capital es una actividad que, si bien ha disminuido en los últimos años, sigue siendo muy fuerte y según el Instituto Metropolitano de Planificación para el año 2024, en Lima y Callao se tendrá de 2, 788, 211 hogares para el 2024 (Instituto Metropolitano de Planificación, 2014). En la Tabla 1.4 se observa la proyección al 2024 distribuido por sector socioeconómico. En ella se ve que las viviendas necesitadas para los sectores D (medio bajo) y E (bajo) ascienden a 836, 226 y 203, 005 unidades de vivienda. Por su parte, el nivel socio económico C (medio Alto) cuenta con 1, 125, 086 unidades. Estos tres sectores comprenden el 77.62% del déficit total limeño.

Tabla 1.4. Proyección de hogares metrópoli de Lima – Callao al 2024

(Fuente de información: Municipalidad Metropolitana de Lima, 2014).

NSE*	Hogares 2007	Hogares 2014	Crecimiento Hogares 2014-19	Crecimiento Hogares 2019-24	Hogares 2024
Alto	116,893	129,449	2,316	5,829	137,595
Medio Alto	390,644	440,458	18,913	26,928	486,299
Medio Alto	827,429	959,294	83,325	82,467	1,125,086
Medio Bajo	594,358	696,453	73,154	66,619	836,226
Bajo	141,772	167,120	19,009	16,877	203,005
Total	2,071,096	2,392,774	196,717	198,720	2,788,211

*Nivel socio económico



Capítulo 2. Estado del arte

Dada la situación actual del medio ambiente, y conocida la necesidad de construir proyectos para satisfacer la gran demanda de vivienda es necesario conocer e implementar todo tipo de metodologías y herramientas que permitan disminuir los plazos de ejecución y sobre todo los impactos ambientales del rubro.

En este sentido, diferentes autores consideran que *Lean Construction* podría tener un efecto positivo, no solo desde el punto de vista económico, sino del punto de vista ambiental. Estudios indican que existe una relación entre sostenibilidad y la filosofía de producción Lean.

A continuación, se describirán los principios fundamentales de *Lean* y posteriormente la relación de éste con el concepto de sostenibilidad y su aplicación al rubro de construcción.

2.1. *Lean Construction*

Autores como Koskela y Huovila (1998), afirman que es posible obtener beneficios ambientales por aplicar los principios de *Lean Construction*, ya que a través de esta filosofía de producción se obtiene reducción de desperdicios, reducción de emisiones contaminantes y maximización de la satisfacción del cliente. En el presente estudio, se utilizará los conceptos propuestos por Lauri Koskela a través de los cuales, se establecieron los principios de la nueva filosofía de producción en la construcción, llamada *Lean Construction*. Estos conceptos se integran en el diseño y control de la producción (Koskela, 1992). A continuación en la tabla 2.1. se muestran los mencionados principios. Cabe mencionar, que en el año 2009, Koskela y colegas, al integrar la filosofía *Lean* con BIM (*Building Information Modelling*) actualizaron dichos principios (Sacks y colegas, 2009).

Tabla 2.1. Principios de *Lean Construction* (basado en Koskela, 1992)

Principio	Descripción
Reducir actividades que no generan valor	Según los requerimientos del cliente, diferenciar las actividades que generan valor de las que no lo hacen. Reducir estas últimas
Incrementar el valor	Incrementar el valor del producto a través de considerar constantemente los requerimientos del cliente. Evaluar y considerarlas a lo largo de todas las etapas del proyecto. Maximizar el valor del producto.
Reducir variabilidad	La variabilidad incrementa la cantidad de actividades que no generan valor. Para reducir la variabilidad se debe realizar una planificación de las actividades en un horizonte de tiempo manejable. Identificar recursos necesarios, actividades previas e información requerida para poder cumplir con la programación de trabajos
Reducir los tiempos del ciclo	Reducción de tiempos de ciclo producto de la eficiencia del flujo y de los procesos productivos. Esto facilita la gestión y control, reduce las interrupciones del proceso productivo y acelera la entrega del producto hacia el cliente.
Simplificar	Este principio induce a simplificar el proceso productivo a través de la reducción de número de pasos en los flujos de materiales e información
Incrementar la flexibilidad de la producción	La flexibilidad en los sistemas productivos reduce los tiempos de ciclo y simplifica los sistemas de producción.
Implementar la gestión visual de los procesos	La visualización de los procesos de producción permite que los trabajadores perciban del estado de los procesos y de las oportunidades de mejora
Control de todo el proceso	Consiste en evaluar y controlar todo el proceso de manera holística.
Mejora Continua	Este principio involucra a cada integrante de una organización, implica un constante control y evaluación de los niveles de excelencia operacional.
Balancear la mejora del flujo con la mejora de procesos	Para mejorar la productividad se debe enfocar tanto en los procesos (actividades de conversión) como en los flujos de procesos.
Benchmark	Este principio indica que se debe buscar las mejores prácticas existentes en el mercado.

2.1.1. Flujos y procesos de conversión

La filosofía tradicional de producción se representa en un modelo de suma de procesos de conversión, los cuales son todos aquellos que transforman inputs en outputs. Estos últimos se valoran en función del costo de los inputs. Como se observa en la Figura 2.1, cada proceso de conversión es controlado uno por uno, de manera independiente, para reducir costos y mejorar la productividad a través de inserciones periódicas de nuevas tecnologías. Sin embargo, este paradigma tradicional de producción no considera los flujos ni las interacciones que se producen entre cada proceso (Koskela, 1992). Estas interacciones pueden ser esperas, traslados, inspecciones, etc. Estas actividades no generan directamente valor añadido al producto, pero están involucradas en el proceso de elaboración, por lo que es un error no considerarlas.

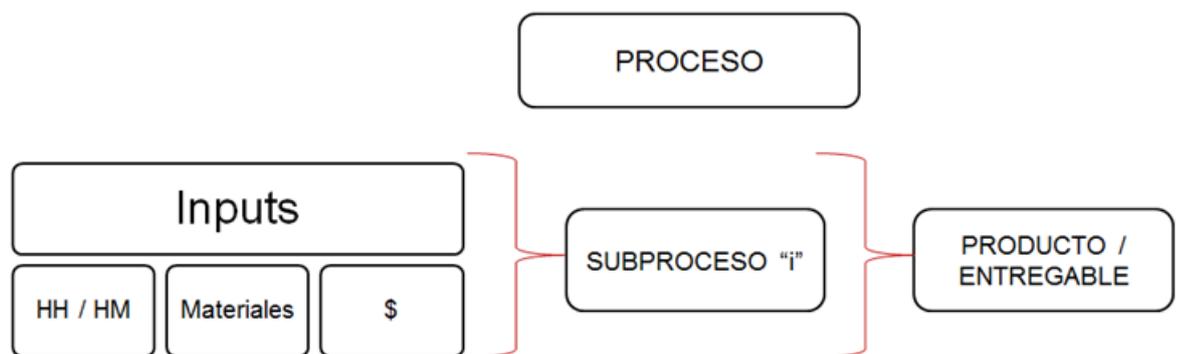


Figura 2.1 Esquema del modelo tradicional de producción. Elaboración Propia

La nueva filosofía de producción integra los flujos con los procesos de conversión, siendo considerada como un flujo de materiales y/o información desde su estado inicial hasta alcanzar el producto final (Koskela, 1992). A diferencia de la filosofía tradicional, la nueva filosofía reconoce que los materiales están en proceso de conversión, inspección, en movimiento o en esperas. De esta forma, se lleva un mejor seguimiento de la eficiencia del sistema de producción. Teniendo un seguimiento más profundo es posible hacerlo más eficaz. La Figura 2.2 esquematiza la forma del flujo de procesos del modelo de producción Lean.



Figura 2.2 Esquema del modelo tradicional de producción (Elaboración propia)

El cuadro comparativo 2.1 muestra de mejor manera las diferencias descritas previamente donde se consideran los aspectos más importantes de producción entre ambos métodos.

Tabla 2.1.- Cuadro comparativo entre la filosofía de producción tradicional y Lean (adaptado de Koskela, 1992)

Filosofía tradicional de producción	Lean Production
Las actividades de producción son concebidas como un conjunto de operaciones individuales	Las actividades de producción son concebidas como flujo de procesos de información y materiales.
Son controladas una por una para reducir costos.	Son controladas para tener mínima variabilidad y tiempos de ciclos.
Las mejoras en la producción se establecen de manera periódica, a través de implementación de nuevas tecnologías.	Las mejoras en la producción se producen continuamente, con respecto al valor generado y a la reducción de desperdicio; y periódicamente con respecto a la eficiencia a través de la introducción de nuevas tecnologías.

2.1.2. Lean Project Delivery System (LPDS)

En el año 2000, Glen Ballard, propone un sistema para gestionar proyectos de manera integral, en el cual se implementan ciertos principios y herramientas de manera organizada que permite planificar, ejecutar y controlar un proyecto. Este sistema, es conocido como *Lean Project Delivery System (LPDS)*. LPDS es un

conjunto de reglas y procedimientos para la toma de decisiones, que tienen como objetivo optimizar el valor del producto para el cliente, maximizar la eficiencia a través de los procesos de diseño y construcción, asimismo, reducir las pérdidas (Mossman, 2008).

En el año 2008, el mismo autor publicó una actualización del LPDS en el que se explica que este sistema consiste en 14 módulos, organizados en las 5 fases interconectadas del ciclo de vida de un proyecto (definición del proyecto, diseño, abastecimiento, ejecución y uso) (Ballard, 2008). Como se observa en la Figura 2.03, once de los módulos se encuentran distribuido en las 5 fases, de tal manera que dos fases comparten un mismo módulo, el cual las relaciona y genera la relación de interdependencia entre las 5 fases. Asimismo, los módulos de control de la producción y estructuración del trabajo se ejecutan a lo largo del ciclo de vida del proyecto; finalmente, el último módulo es el de evaluación post ocupación, en el cual se busca un análisis de lecciones aprendidas a manera de retroalimentación y constante aprendizaje. Este módulo es el vínculo entre la finalización de un proyecto y el comienzo de otro.

Ballard (2008), indica ciertas características esenciales de este sistema de gestión de proyectos en las cuales precisa que el proyecto es estructurado y gestionado como un proceso que busca generar valor; el enfoque principal es lograr que flujo de trabajo sea confiable, mas no el reunir esfuerzos para mejorar un proceso aislado; se utilizan “colchones” de material y de capacidad para reducir los efectos de la variabilidad, estos son conocidos como *buffers* y se incentiva constante retroalimentación y adaptabilidad del sistema: Mejora continua.

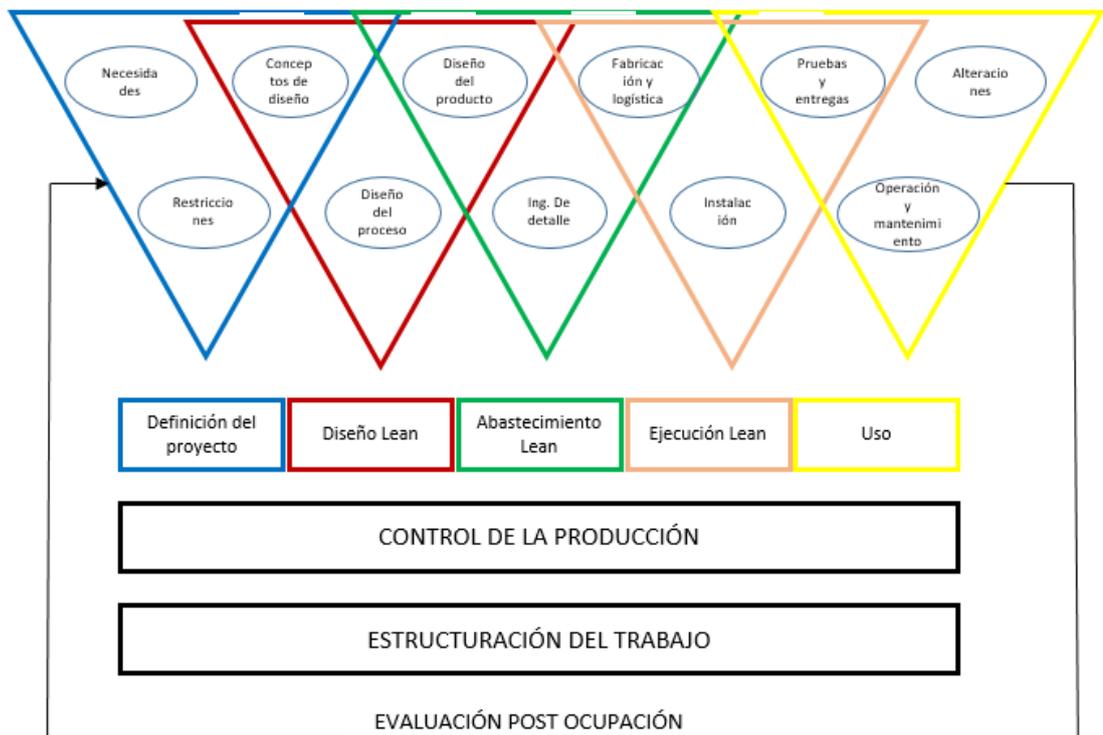


Figura 2.03.- Lean Project Delivery System (Adaptado de Ballard, G. 2008)

Según LPDS, la fase de definición del proyecto requiere de la interacción de 3 módulos: análisis de restricciones, objetivos del proyecto y criterios de diseño. Será gestionada por el Gerente del proyecto, quien será el responsable ante el cliente. En esta etapa se establece el criterio de diseño tanto para la definición del producto como la ejecución. Asimismo, las necesidades del cliente serán traducidas como criterios de diseño del producto. Por otro lado, para la toma de decisiones se incluirá a los principales involucrados como son: especialistas de diseño y de construcción, proveedores de materiales y equipos, usuarios finales, inspectores; entre otros. La Figura 2.04 resume el flujo de la fase de definición.

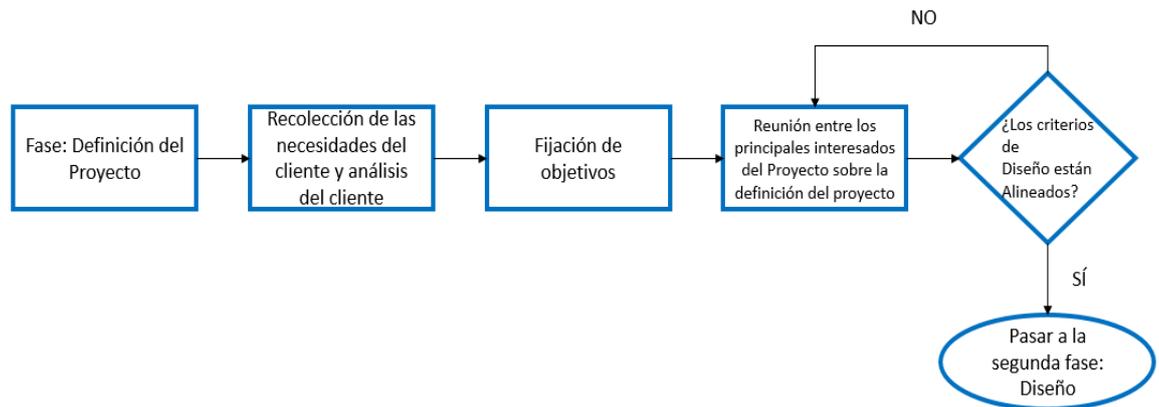


Figura 2.04.- Definición del Proyecto (Adaptado de Ruiz Conejo, 2015)

La segunda fase involucra la interacción de tres módulos: diseño conceptual, diseño del proceso y diseño del producto. En esta desarrolla el diseño del producto y del proceso, según los criterios establecidos en la fase de Definición. El objetivo principal es desarrollar la mejor opción del diseño del producto en la que las necesidades del cliente sean satisfechas y se maximice el valor para él, incluso hasta extender sus necesidades. Asimismo, se busca establecer un sistema de producción en el que se optimice el flujo. Finalmente, el valor de esta fase sobre el ciclo de vida de un producto es notable. Un mal diseño puede conllevar a un uso inadecuado de recursos e incluso a una mala planificación.

La etapa de abastecimiento *Lean* también involucra la interacción de tres módulos: diseño del producto, ingeniería de detalle y procura/fabricación. El objetivo de esta fase es desarrollar el sistema de procura, compra y fabricación de materiales necesarios para cumplir con la ejecución de lo especificado en la ingeniería de detalle, información proveniente de la fase de diseño. Asimismo, establecer un sistema de suministro e inventarios.

La etapa de ejecución inicia con el abastecimiento de materiales, equipos, herramientas y mano de obra, continúa con la ejecución de los trabajos y finaliza con la entrega del producto final al cliente. Para esta etapa se involucra la interacción de los siguientes módulos: procura/fabricación, instalación, y pruebas y entregas.

Finalmente, la fase finaliza cuando se pone en servicio el producto por parte del cliente, es decir, cuando el producto ha sido entregado al cliente. En esta fase

participan los siguientes módulos: pruebas y entregas, operación y mantenimiento, y cambios.

De los dos módulos presentes durante todo el ciclo de vida del proyecto, el control de la producción conocido como *Last Planner System* (LPS), gobierna la ejecución de lo planificado. El término control hace referencia a lograr un “futuro deseado”, donde se entiende “deseado” como aquello que ha sido planificado, y no se refiere a identificar las desviaciones con respecto a lo programado. Asimismo, *Last planner* es el nombre utilizado por LCI (*Lean Construction Institute*) para el módulo de control de la producción. El control de la producción consiste en el control del flujo de trabajo y control de la unidad de producción. El primero de ellos se logra a través del *lookahead*, mientras que el segundo, a través de la programación semanal.

El *lookahead*, es un instrumento del LPS en el que se asigna recursos a una actividad programada para ser ejecutada, tiene un horizonte de tiempo futuro que varía entre 3 a 6 semanas. Cada proyecto, de acuerdo a su complejidad, lo utiliza con más o menos horizonte de tiempo; sin embargo, lo común es sea de 4 semanas. Asimismo, permite la identificación de restricciones para lograr el avance programado, por lo que permite el levantamiento de estas de manera oportuna.

El segundo módulo presente durante todo el proyecto es la estructuración del trabajo. Este módulo que está presente a lo largo del ciclo de vida de un proyecto. Su principal objetivo es lograr que el flujo de trabajo sea más confiable y rápido, mientras que se genera valor al cliente. (Ballard, 2000)

La estructuración del trabajo consiste en diseñar el sistema de producción definir con exactitud quiénes son los responsables de ejecutar las actividades, en qué momento, dónde y cómo. De esta manera se logra optimizar el flujo y el rendimiento general del sistema (Pons, 2014).

2.2 Sistema de producción eficiente y efectivo

Lean Construction busca cumplir con los objetivos de maximizar el valor del producto y eliminar desperdicios, a través de un sistema de producción efectivo y eficiente, es decir, un sistema capaz de cumplir con los objetivos planificados de manera óptima en el uso de recursos. Para lograr estas metas, el sistema de gestión de la producción debe cumplir con tres objetivos donde se tiene un orden de prioridad

Primero, se debe lograr que los flujos no paren, lo cual implica utilizar herramientas que ayuden a prevenir y mitigar el impacto de la variabilidad. Estas pueden ser control sobre la variabilidad y el LPS. La variabilidad se reduce a través del uso de procesos de producción con menor incertidumbre, y el uso de *buffers* (colchones que permiten sobreponerse ante un evento no contemplado y que la producción no pare). El *Last Planner System* es una herramienta cuyo objetivo es lograr cumplir con éxito lo planificado: programación *lookahead*.

En segundo lugar, se tiene que conseguir que los flujos sean eficientes y similares en cada estación de trabajo, es decir, tener un flujo de trabajo balanceado, para lograr eficiencia total del sistema y no de cada proceso de manera aislada. La física de producción busca identificar cuál es la estación de trabajo que tiene menor capacidad de producción, la cual es la que determina la capacidad total del sistema. Esta estación de trabajo es conocida como cuello de botella. A partir de esto se busca reajustar la capacidad de las siguientes estaciones de trabajo. Aplicando los conceptos de la física de producción es que se puede tener una producción que optimice el consumo de recursos, ya que no se generará ninguna sobre producción en ninguna estación de trabajo, ni tampoco pérdidas por falta de capacidad de producción.

Finalmente, se tiene que lograr obtener procesos eficientes. El enfoque de *Lean* es siempre buscar las mejoras en el flujo. Esto se logra a través de nuevas tecnologías, inversión en equipos con mayor capacidad o aumentando la cantidad de mano de obra.

2.3 Relación entre Sostenibilidad y *Lean*

Se han realizado varios estudios en donde se busca una compatibilidad entre desarrollo sostenible y la filosofía *lean* de producción. Dues et al (2011) encontró las áreas donde la filosofía *lean* y producción sostenible tienen conceptos en común y puntos opuestos. En primer lugar, *lean* y sostenibilidad tienen en común el concepto de desperdicio, y las técnicas para reducirlo; la gente y su organización, reducción tiempos de espera, relaciones en la cadena de abastecimiento, divulgación y masificación de buenas prácticas.

Asimismo, las áreas donde la relación entre producción sostenible y los conceptos *lean* no tienen puntos en común se basan en la diferencia en el enfoque que una ideología le da al concepto de desperdicio. Para *lean* este significa todo aquello que no genera valor, mientras que la importancia del concepto desperdicio para

sostenibilidad es la del impacto ambiental y social generado por un subproducto indeseado resultante del ciclo productivo. Además, la producción sostenible busca también reutilizar dichos desperdicios, mientras que *Lean* no, sólo minimizarlos. Podemos deducir que ambos conceptos son compatibles, ya que sus fundamentos lo son; solo cabe aclarar qué es considerado como desperdicio.

Bergmiller et al (2009) explica acerca de la sinergia que existe entre *lean* y *Green* (sostenibilidad ambiental). Dicha sinergia parte de que ambos conceptos buscan la participación activa de todos los miembros de una organización para la implementación y la fomentación de la identificación y reducción de los desperdicios y la búsqueda continua de mejora en estos aspectos.

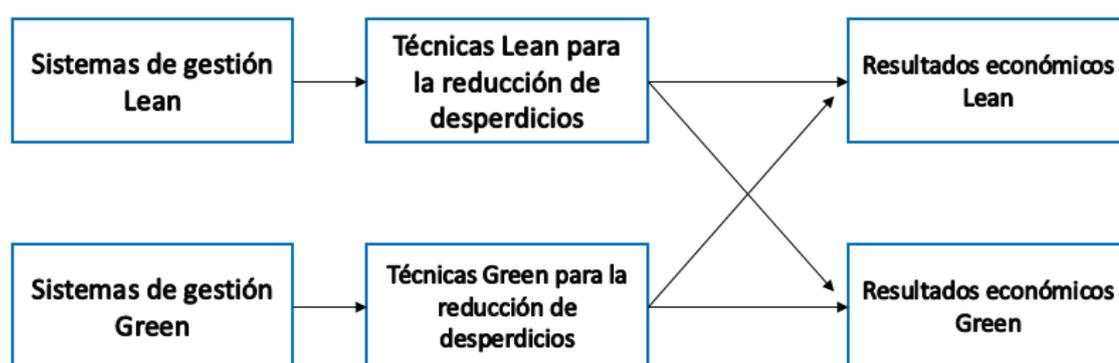


Figura 2.05.- Sinergia entre las operaciones Lean y Green
(Adaptado de Bergmiller et al, 2009)

Para corroborar esta sinergia, los autores propusieron una hipótesis, la cual consiste en que si existe una correlación entre *lean* y *Green* entonces aquellas compañías que utilicen métodos de producción *Green* tendrán mejores resultados en impactos de producción que aquellas que no. Dicha hipótesis fue medida a través de la comparación de resultados obtenidos de en los rubros de *Green Management Systems (GMS)* y *Green Waste Reduction Techniques (GWRT)* versus los resultados en la categoría *Lean Manufacturing*, los cuales fueron obtenidos gracias a la valoración del *SHINGO PRIZE*, que mide el grado de excelencia, calidad y costos de los procesos de manufactura, así como la satisfacción de los clientes, en Estados Unidos de América.

Los resultados evidenciaron que aquellas compañías que implementaron en su proceso de manufactura elementos de GMS y GWRT obtuvieron mayor puntuación en los rubros de costo, calidad y satisfacción del cliente en el SHINGO PRIZE, que

aquellas empresas que no los incluyeron. Además, se evidenció que implementar sistemas de gestión ambiental (como por ejemplo la certificación ISO 14001) está relacionada a la mejor performance en los sistemas de calidad de producción.

Como un punto adicional, Bergmiller et al (2009), demostró la oportunidad de creación de nuevos mercados, ya que a los consumidores les es atractivo conocer que el producto que consumen ha sido fabricado de la forma con menor impacto ambiental posible.

De la misma forma, Bhamu y colegas (2014) menciona que las empresas que aplican *Lean Manufacturing* tienen una ventaja competitiva debido a que las mejoras en los procesos productivos generan reducción del costo, aumento de productividad y calidad. Asimismo, menciona que el objetivo de aplicar los lineamientos de *Lean manufacturing* es tener alta capacidad de respuesta ante la demanda de clientes a través de la reducción de desperdicios.

La reducción de desperdicios que el autor menciona incluye la disminución del tiempo de espera, mejora en el tiempo de procesamiento y del ciclo productivo, así como la reducción de desperdicios materiales y productos defectuosos. Estos últimos están en correlación a la aceptación de desperdicio del punto de vista de sostenibilidad. Por lo que, según Bhamu et al (2014), podemos inferir que la aplicación de la filosofía *Lean* es capaz de mejorar la sostenibilidad de un proceso productivo al reducir la cantidad de productos desechados por falta de calidad y por la reducción de residuos producto de del proceso de fabricación.

Ritu Ahuja (2012), menciona que en el rubro de la construcción se tienen severos problemas de sobre costos, demoras en la entrega de productos, baja productividad y falta de calidad. Asimismo, considera que cada vez más existe mayor toma de conciencia en los impactos ambientales generados por el rubro. El autor afirma que estos problemas pueden ser atacados reduciendo los desperdicios, utilizando las herramientas de *Lean Construction* y *Lean Management*.

Asimismo, Ritu Ahuja (2012) identifica una relación práctica entre los conceptos de *Lean* y sostenibilidad en las 4 fases del *Lean Project Delivery System*. Estas fases son: Definición del proyecto, Diseño del producto, Suministro, Ejecución. En cada una de estas etapas, se indican puntos clave para alcanzar la sostenibilidad.

En la fase de definición del proyecto es clave definir en qué consiste el proyecto, y por ende, qué es lo que agrega valor al proyecto y qué es considerado desperdicio, es decir, identificar qué es aquello no genera ningún tipo de valor al producto. Para

realizar dicha definición se debe considerar las necesidades del cliente. En recientes estudios se menciona que es necesario tomar en cuenta al medio ambiente como uno de los “clientes” del producto (Horman et al., 2004; Lapinski et al., 2005).

En esta etapa, se debe buscar conceptualizar un producto en el que predomine la eficiencia en uso de recursos, la reducción de impactos ambientales durante su construcción y el uso de materiales no dañinos.

La segunda fase, diseño del producto, incluye un proceso de selección de varias técnicas constructivas y de materiales con el fin de generar valor al cliente. Este proceso es muy importante ya que tiene un gran impacto en el ciclo de vida del producto. El diseño debe realizarse de manera holística y coordinada con todas las especialidades de un proyecto, en donde se busque utilizar materiales sostenibles, y óptimas tecnologías y métodos constructivos.

En esta etapa, Ritu Ahuja (2012) menciona que existen diferentes métodos que pueden ser implementados, entre ellos, el modelamiento en 3-D. En el cual se pueden identificar incompatibilidades y/o mejoras al producto, lo cual puede evitar la generación de desperdicios por deficiencias en el diseño. Es vital encontrar imperfectos en la etapa de diseño ya que la corrección de estos es menos costosa y evita generación de productos defectuosos y de desperdicio.

La tercera etapa consiste en el abastecimiento de materiales para la construcción del producto. El enfoque de *Lean* con respecto al abastecimiento está relacionada al concepto de *Just in Time (JIT)*, al cual el autor atribuye tanto efectos positivos como negativos con respecto al impacto del medio ambiente. En cuanto a los efectos positivos, el autor considera que JIT minimiza la cantidad de inventario por almacenaje de materiales y la merma de estos. Sin embargo, el aumento de frecuencia de transporte para abastecimiento de materiales resulta en una mayor cantidad de emisión de VOC (*Volatile Organic Compounds*) y gases de efecto invernadero. La etapa de abastecimiento según *Lean* es un punto clave para el análisis de la presente tesis, pues como se puede ver, aplicar JIT induce a tener mayor cantidad de despachos de materiales, y por ende, mayor emisiones por transporte (Ritu Ahuja, 2012).

Finalmente, en la etapa de ejecución, el autor reconoce que la oportunidad de implementar la prefabricación de elementos en la etapa de construcción puede ser positivo para alcanzar la sostenibilidad. Sin embargo, al igual que el concepto JIT, también tiene efectos negativos. Por ejemplo, utilizar elementos prefabricados puede asegurar mejores condiciones de seguridad en el trabajo, reducción de impactos

ambientales por traslado de una planta de fabricación de productos a obra, una planta especializada en pre fabricar ciertos productos tiene la oportunidad de desarrollar mayor productividad en sus trabajadores, así como implementar el uso de materiales verdes y reducir el desperdicio de materiales. Es decir, en una planta especializada de pre fabricación se puede aplicar el concepto *Kaizen*, que en japonés significa mejora continua (Ritu Ahuja, 2012).

Por otro lado, entre los efectos negativos de la prefabricación el autor considera que resumen en dos aspectos. El primero de ellos, es la menor cantidad de mano de obra que se requiere, ya que ésta es optimizada en la planta de pre fabricación. En segundo lugar, es que existe un mayor transporte y por ende emisión de VOC y CO₂. Esto puede ser especialmente crítico, dependiendo del lugar donde se ubique la planta de pre fabricación y el proyecto en ejecución.

Carneiro y colegas (2012), muestran una matriz de interacción entre la certificación LEED y el método de *Lean* de construcción. La certificación Leed (por las siglas en inglés de Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) desarrollado por el US. *Green Building Council* (USGBC) es una guía para identificar, implementar y medir el diseño, construcción, operación y mantenimiento de un edificio y vecindario “verde”.

LEED busca optimizar el uso de recursos naturales, maximizar los impactos positivos al medio ambiente, salud humana, y minimizar los negativos ocasionados por la industria de la construcción. De esta manera, LEED evalúa el desempeño ambiental de una edificación dentro de todo su ciclo de vida, mediante el cumplimiento de una lista de requisitos clasificados según los siguientes criterios: ubicación sostenible de la edificación, eficiencia en el uso del agua, consumo energético y emisiones atmosféricas, materiales y recursos a utilizar, calidad del ambiente al interior del edificio, innovación en el diseño y operación, y uso de recursos locales (Carneiro et al., 2012).

La matriz se realizó cruzando las categorías de evaluación de la certificación Leed con los 11 principios de la construcción *Lean* propuestos por Koskela en su reporte técnico 72, en orden de establecer relaciones teóricas para identificar relaciones entre ambos.

En los resultados obtenidos se encontró que LEED, al ser una herramienta de certificación ambiental, no sólo dificulta la flexibilidad, sino que no se centra en la reducción y mejora de procesos. Además, se encontró que la mayoría de requerimientos LEED se encuentran en la etapa de diseño mas no en la etapa de construcción y los métodos constructivos de una edificación; razón por la cual el

principio *Lean* con más influencia es el segundo (aumentar el valor del producto en base a los requerimientos del cliente). Asimismo, los conceptos de reducción de desperdicios son diferentes, *Lean Construction*, concentra la reducción dentro del flujo y la conversión de procesos enfocándose en el sistema constructivo, pero sin preocupación en el desempeño ambiental. Sin embargo, la matriz sí muestra una relación de ayuda en cuanto a la reducción de la variabilidad del proyecto, debido a los requerimientos ambientales de la certificación, lo que luego afecta directamente a la conversión de procesos y mejora continua.

Carneiro et al. (2012) concluyen que la certificación LEED y *Lean Construction* sí contribuye a una construcción sostenible porque está presente tres ámbitos de sostenibilidad: económico, medioambiente y social. Finalmente, sugieren que se realicen futuros estudios prácticos de la construcción de una edificación la cual quiera recibir dicha certificación usando el método de *Lean Construction* para obtener mayor información entre ambos.

2.4 Implementación de construcción sostenible

Estos conceptos fundamentales enmarcan la base sobre la cual se sostienen las herramientas que aseguran que no solo se ejecute un proyecto de acuerdo a los principios de *Lean Construction*, sino que también permite que se establezca una relación positiva entre lean y sostenibilidad.

Existen diferentes definiciones para desarrollo sostenible, sin embargo, utilizaremos la siguiente:

“El desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente, sin afectar la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer las suyas” (Brundtland Report, 1987)

Esta definición de desarrollo sostenible menciona que se debe continuar con los desarrollos tecnológicos, industriales, de infraestructura, comunicación y calidad de vida de la de las personas en la sociedad; sin embargo, este desarrollo debe ser responsable con el uso de recursos naturales y debe tener un control de las emisiones de contaminantes producto de procesos productivos, de manera tal que la sociedad actual y las futuras puedan satisfacer sus necesidades sin verse afectadas (Brundtland Report, 1987).

A continuación, en la Tabla 2.2, se presentará herramientas de *Lean*, su definición, la consecuencia de su aplicación en el proceso constructivo, y el por qué su aplicación contribuye hacia el desarrollo de una ingeniería sostenible.



Tabla 2.2. Herramientas Lean que contribuyen a una producción sostenible (Elaboración propia).

HERRAMIENTA	DEFINICIÓN	CONSECUENCIA	BENEFICIO AMBIENTAL
KAIZEN ¹	Término en japonés que significa mejora continua	Continua evaluación y mejora de procesos. Difusión de buenas prácticas. Mejoras en la calidad y productividad del proceso productivo. Se induce a todo el personal involucrado a contribuir con ideas para alcanzar este objetivo.	Optimización de procesos, que conlleva a la optimización de recursos, energía, Horas Hombre, y reducción de re trabajos (desperdicio material)
SECTORIZACIÓN / TRENES DE TRABAJO ²	Sectorización es una forma de dividir el trabajo en partes similares de forma repetitiva. Trenes de trabajo: involucra la programación de los trabajos sectorizados de manera repetitiva y secuencial.	Se desarrolla "expertiz" en la mano de obra y demás involucrados, es decir, se genera una curva de aprendizaje. Propicia una programación más confiable.	Se aumenta eficiencia de tiempo productivo y por ende, menor consumo de energía, recursos, horas hombre trabajadas; mejor calidad del producto y velocidad de entrega.
LOOKAHEAD PLAN / PROGRAMACIÓN SEMANAL ³	Método de planificación de intervalo corto, donde se analizan actividades listas para ser asignadas a ejecución, y se analizan restricciones	Óptima ejecución de trabajos. Disminución de actividades programadas mal ejecutadas o no ejecutadas. Óptima asignación de recursos.	Disminución de desperdicios materiales. Disminución de retrabajos por errores en planificación. Ejecución de trabajo de acuerdo a especificaciones técnicas/solicitadas por cliente
ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD ⁴	Conjunto de herramientas y sistemas de control que buscan el cumplimiento de procesos estandarizados para asegurar la producción un producto de acuerdo a los requerimientos del cliente.	Control al proceso de ejecución. Estandarización de procesos. Mejora continua y búsqueda de mejores procedimientos.	Productos ejecutados sin reprocesos. Ejecución sin desperdicios por falta de calidad (incumplimiento de especificaciones solicitadas por el cliente)
PROCURA ⁵	Planificación y ejecución de la adquisición de materiales, herramientas y equipos que serán utilizados en el proyecto.	Óptima elección de productos y formas de abastecimiento.	Óptima elección de materiales y proveedores. Anticipación conlleva a elección de materiales eco amigables y de producción local (para evitar largos traslados)
LPDS ³	Conjunto de reglas y procedimientos para la toma de decisiones, que tienen como objetivo optimizar el valor del producto para el cliente, maximizar la eficiencia a través de los procesos de diseño y construcción, asimismo, reducir las pérdidas	La importancia del LPDS para la etapa de definición es la de no ejecutar trabajos que no cumplan con las expectativas del cliente y por ende no desechar trabajos realizados, y evitar pérdidas de material/productos/tiempo/energía.	Reducción de: - trabajos rehechos - Desperdicios de tiempo, materiales, energía - Cumplimiento con expectativas del cliente - Mejor planificación - Mejor ejecución
LAST PLANNER SYSTEM ³	Control de la producción	Materialización de la planificación.	Disminución de desperdicios materiales. Disminución de retrabajos por errores en planificación. Ejecución de trabajo de acuerdo a especificaciones técnicas/solicitadas por cliente

1. Pons, J. F. (2014)
2. Guzman, A. (2014).
3. Ballard, G. (2000).
4. Quality Assurance vs Quality Control (2017)
5. Supply Management Defined (2017)

Capítulo 3. Metodología

3.1. Objetivos e hipótesis

El objetivo general de la presente investigación es contribuir a la literatura con respecto a formas de alcanzar una construcción más eficiente en el uso de recursos, energía primaria y que en el que también se reduzca la generación de impactos ambientales y residuos sólidos.

Por otro lado, partiendo de la hipótesis que la implementación de las herramientas de *Lean Construction* contribuyen no solo a un aumento en la productividad, sino también a la reducción de generación de residuos sólidos y otros impactos ambientales producto de la construcción; se tiene que el primer objetivo específico es el de demostrar que la aplicación de la filosofía *Lean* en el rubro tiene un impacto positivo en el propósito de lograr una construcción sostenible. Asimismo, el segundo, es el de cuantificar la contribución de la implementación de la filosofía *Lean Construction* para alcanzar la construcción sostenible. Finalmente, el último objetivo específico es el de identificar cuáles son los puntos de esta filosofía que pueden ser mejorados.

3.2. Alcance

La presente investigación abarca el análisis comparativo entre la filosofía *Lean Construction* y el método tradicional de construcción, y hallar las diferencias en los cronogramas de ejecución e impactos ambientales generados durante su aplicación. Esto es aplicado a la etapa de construcción de estructuras de un edificio de vivienda masiva con sistema estructural de muros de ductilidad limitada. Para el cálculo de impactos ambientales, se analizaron únicamente el concreto premezclado y acero reforzado de las estructuras.

3.3. Marco metodológico

Según lo mostrado en la Figura 3.01, se realizó un análisis comparativo de la simulación de la construcción de un proyecto inmobiliario de vivienda masiva a través de dos metodologías. La primera de ellas, consiste en el sistema de construcción tradicional, el cual está asociado a la metodología de producción tradicional (previo a la implementación de herramientas *Lean*). La segunda metodología analizada consideró la implementación de las herramientas y principios de *Lean Construction*.

El siguiente proceso, según lo ilustrado en la Figura 3.01, fue el de cuantificar los porcentajes de desperdicios para ambas metodologías. En el caso, de *Lean*

Construction, se realizaron encuestas (Anexo 01) dirigidas a ingenieros de producción, residentes o de oficina técnica de proyectos de construcción ejecutados recientemente. El objetivo de la encuesta fue obtener porcentajes reales de desperdicios de materiales y al mismo tiempo encontrar una relación positiva o negativa entre el grado de implementación de *Lean Construction* y la reducción de impactos ambientales. Por otro lado, para obtener los porcentajes de desperdicios en la metodología tradicional, se recurrió a la literatura existente (ediciones pasadas de CAPECO) y entrevistas.

Posteriormente, una vez simulada la construcción del proyecto a través de ambas metodologías, se realizó un análisis comparativo entre ellas, en el cual se encontraron las diferencias en el consumo energético, generación de desperdicios de materiales y tiempos de duración de actividades. Se obtuvieron los impactos ambientales producidos por estas diferencias, los cuales serán cuantificados a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

De esta manera, se pudo cuantificar como *Lean Construction* permite minimizar el impacto ambiental producido por una actividad intensiva en el uso de recursos y generación de impactos ambientales, como lo es el rubro de construcción.

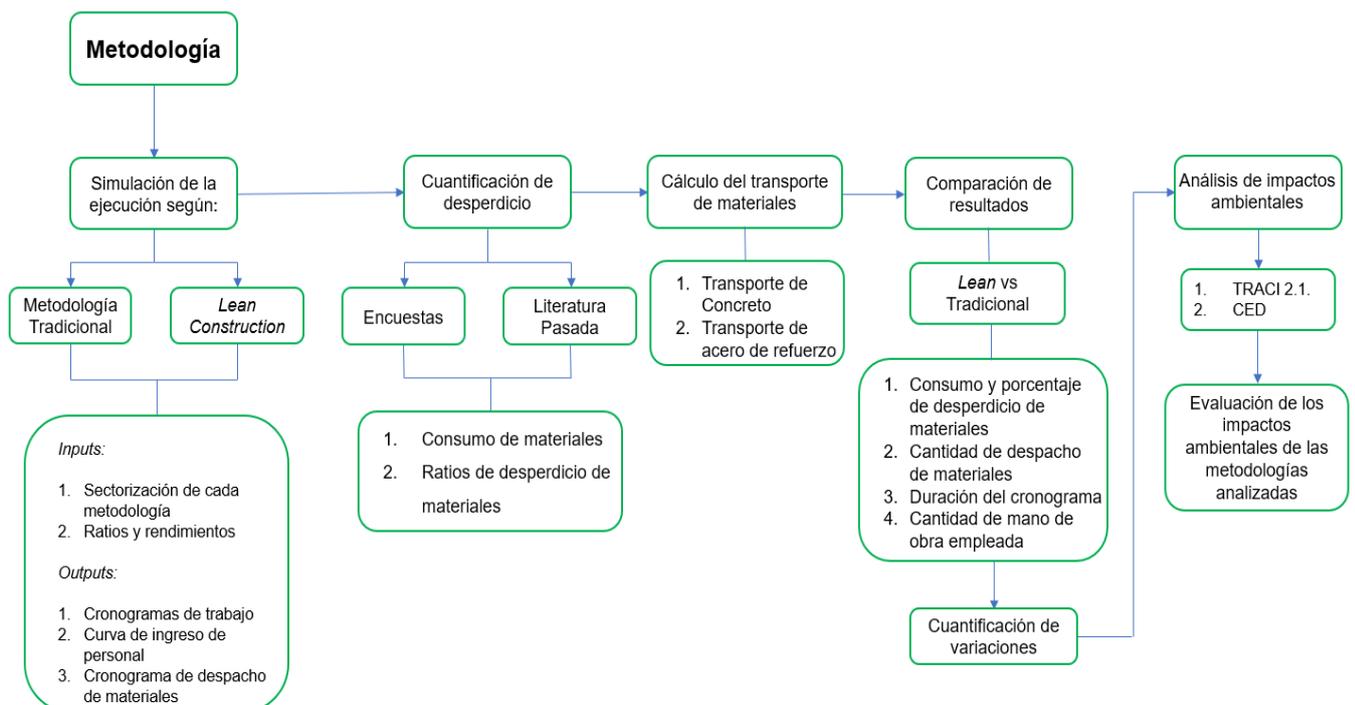


Figura 3.01. Procedimiento metodológico utilizado. (Elaboración propia)

3.4. Análisis de impactos ambientales

3.4.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La forma de evaluar los impactos ambientales potenciales se realizó a través de una herramienta de análisis llamada Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV es utilizado para calcular los impactos ambientales y energéticos de un producto (Cáceres, 2016)

Según la norma ISO 14040, 2006, el ACV es una herramienta que permite cuantificar los aspectos e impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, es decir, desde la extracción de la materia prima, producción, uso hasta su disposición final. El ACV es definido como la compilación y evaluación de entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema a lo largo de todo su ciclo de vida y consta de 4 etapas las cuales se observan en la Figura 3.02.

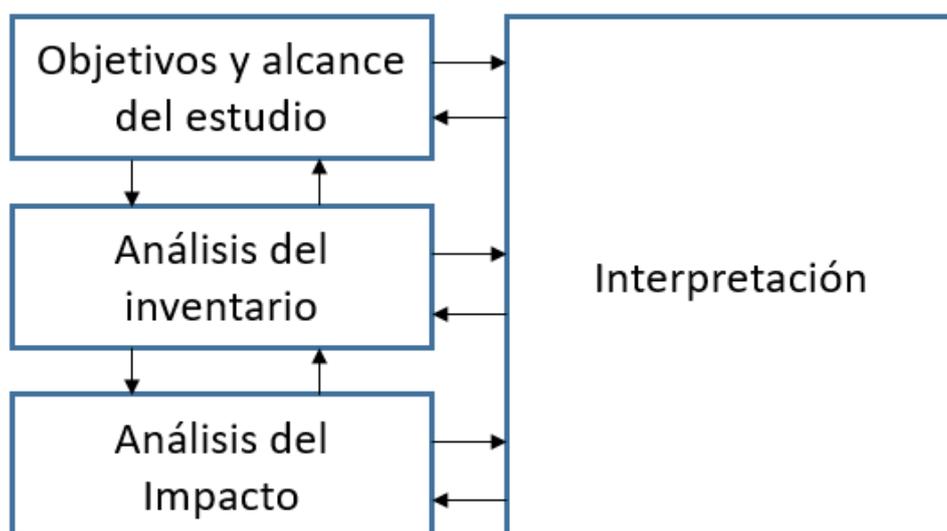


Figura 3.02 Etapas del ACV (adaptado de ISO 14040, 2006)

Para realizar un ACV se debe realizar primero un modelo simplificado que represente una realidad más compleja. El ideal es realizar un modelo que no se aleje demasiado de la realidad. Para ello se debe definir los objetivos y el alcance del análisis.

En cuanto a los objetivos del ACV, se debe definir la razón del estudio y la aplicación de su desarrollo. Asimismo, como parte de la definición del alcance se debe establecer cuáles son los procesos, límites del estudio y qué categorías de impactos ambientales van a ser incluidos. Además se define cuál es la unidad funcional del sistema. Finalmente, se debe precisar cuáles son las limitaciones del sistema y qué se ha asumido.

El análisis del inventario debe recopilar la información y procedimientos de cálculo de las entradas y salidas del sistema en estudio donde se distinguen dos procesos en esta etapa: recopilación de datos y el cálculo de los mismos. En primer lugar, en la recopilación de datos se obtiene toda la información pertinente al sistema en estudio. Esto debe estar acorde a los objetivos y alcances planteados. Asimismo, considera todas las entradas de energía, materia prima, productos, co productos y residuos. Igualmente a emisiones al aire, agua y suelos.

La recopilación de datos se divide en data del primer plano y data de estudios pasados. La data de primer plano es la información que hay que recolectar acerca de un sistema de producción en particular. Por ejemplo, si se modela el ciclo de vida de un monitor de TV, se podría considerar en algún punto el ACV del transporte en una camioneta. En segundo lugar, la data de estudios pasados es la que se encuentra disponible en las bases de datos; para esta investigación, se usó la base de datos Ecoinvent V3. Por ejemplo, si se realiza un ACV del transporte con una camioneta basta con conseguir los datos del kilometraje recorrido y la carga. Finalmente, una vez obtenidos todos los datos se procede a validarlos y hallar la relación de ellos mediante el cálculo de procesos unitarios.

La evaluación del impacto del ciclo de vida tiene el propósito de valorar qué tan significativos son los impactos ambientales potenciales obtenidos a través del ACV (ISO 14040, 2006). Este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con sus indicadores para entender estos impactos.

Finalmente, en la fase de interpretación se debe proporcionar resultados coherentes con los objetivos y alcances definidos, donde se llegue a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones. Además, se debe mencionar que con el ACV no se predicen los impactos reales en los puntos finales de cada categoría.

3.4.2. Software para desarrollo de ACV

El ACV será llevado a cabo con uno de los más reconocidos *softwares* para ACV, SimaPro 8.3, el cual es una herramienta que permite recolectar, analizar y monitorear los impactos ambientales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida (PRÉ *Consultans*, 2016). Asimismo, este programa permite identificar los puntos críticos dentro de la cadena de suministro, desde la extracción de materiales, procesamiento, distribución y disposición final.

Este software incluye diferentes bases de datos, como por ejemplo, Agri-footprint, que es utilizada para realizar ACV en la procesos o productos agrícolas; Ecoinvent, que actualmente es la base de datos más difundida y la que utilizará para la siguiente investigación.

3.4.2.1. Base de datos Ecoinvent

Actualmente, SimaPro viene con la base de datos Ecoinvent V3, la cual provee información de la huella ambiental de más de 10 mil procesos (Ecoinvent, 2013). Esta base de datos es el resultado del esfuerzo conjunto de diferentes instituciones suizas por actualizar constantemente e integrar múltiples bases de datos. Existen 6 tipos de set de data en la base de datos Ecoinvent, integrados en SimaPro:

1. *Allocation default, unit processes*
2. *Allocation default, system processes*
3. *Allocation recycled content, unit processes*
4. *Allocation recycled content, system processes*
5. *Consequential, unit processes*
6. *Consequential, system processes*

La diferencia entre el set de datos *Allocation* y set *Consequential*, es que en el último se aplica cuando se quiere investigar las consecuencias de un cambio dentro de un sistema o proceso versus una línea base (Ecoinvent, 2013). Por otro lado, el set *allocation* es utilizado para conocer los impactos ambientales de un producto y los puntos críticos a lo largo de su ciclo de vida. En el set de datos *allocation*, todos los inputs y outputs son considerados a lo largo del ciclo de vida de los mismos, es decir, desde la cuna hasta la tumba.

Por otro lado, la diferencia entre los modelos *Allocation recycled* y *allocation default*, es que el primero de ellos no toma en consideración ningún beneficio producto del reciclaje de algún material. Finalmente, los procesos unitarios y de sistema presentan los mismos resultados; sin embargo, el primero de ellos muestra el árbol de procesos y la contribución de cada proceso durante el ciclo de vida ; además, hace referencia como input del sistema a otras unidades de procesos. Mientras que el proceso tipo sistema no muestra el árbol de procesos ni genera relaciones con los demás procesos.

3.4.2.2. Métodos de análisis de impactos ambientales

SimaPro incluye un gran número de métodos de análisis de impactos ambientales, los cuales son utilizados para calcular los impactos ambientales por categoría. Para la presente investigación se utilizaron 2 métodos distintos: TRACI 2.1 para emisiones de contaminantes en el aire y consumo de combustibles fósiles y CED para el cálculo de consumo de energía primaria.

TRACI proviene por las siglas de “*Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts*”, cuya traducción es “Herramienta para la reducción y análisis de los impactos químicos y ambientales”. Es un programa de cómputo desarrollado de manera independiente por la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés), para la medición de sostenibilidad y análisis de ciclo de vida. Es una herramienta de indicadores intermedios, los cuales se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Categorías de impactos y medios que son afectados (Adaptada de EPA 2012)

Indicador de impacto	Unidad	Medio de impacto	Descripción
Agotamiento de ozono	kg CFCEq	Aire	Potencial de disminución de capa de ozono
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	Aire	Potencial de aumento promedio de temperatura atmosférica
Formación de smog fotoquímico	kg O ₃ eq	Aire	Formación de ozono troposférico
Acidificación	kg SO ₂ eq	Aire, agua	Incremento de la concentración de H ⁺ en el medio ambiente
Eutrofización	kg N eq	Aire, agua	Aumento de fosfato y nitratos (nutrientes) en un ambiente acuático
Cancerígenos y No cancerígenos	CTUh*	Aire, agua, suelo	Unidad comparativa en relación al daño al ser humano por kg de sustancia emitida
Partículas con efectos respiratorios	kg PM 2.5eq	Aire	Cantidad de partículas de 2.5µm suspendidas en el ambiente
Ecotoxicidad	CTUe*	Aire, agua, suelo	Potencial de una sustancia para ocasionar daño al medio en el fue emitido
Consumo de combustibles fósiles	MJ	-	Cantidad de combustible fósil que ha sido extraído para generar energía

*CTUh: Unidad tóxica comparativa para impactos de la toxicidad en humanos

*CTUe: Unidad tóxica comparativa para impactos de la ecotoxicidad acuática

CED (Cumulative Energy Demand, CED) es un método para calcular el consumo total de energía primaria en el ciclo de vida de un producto o servicio, expresado en MJ (Mega Joules). Además, CED expresa la cantidad de energía utilizada según el tipo de fuente de donde se obtiene, utilizando energía fósil no renovable, renovables de biomasa, eólica, hidráulica, solar y geotérmica

3.4.3. ACV de materiales

Una vez obtenidos los modelos de , se calcularon las diferencias en la generación de desperdicios de materiales entre ambas metodologías. Luego, los valores obtenidos fueron introducidos en el *software* SimaPro para obtener los impactos ambientales potenciales de los materiales estudiados.

Para el acero corrugado $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ se utilizó el proceso “*Reinforcing steel {RoW} | production | Alloc Def, U*”, en el cual se consideran actividades desde la llegada de materia prima a la llegada en la planta acerera, el proceso del acero laminado en caliente. Las actividades terminan una vez finalizada la manufactura de las barras de acero (no se considera transporte a obra)

En el caso del concreto premezclado $f'_c=175 \text{ kg/cm}^2$ se utilizó un proceso propio, creado para darle las propiedades necesarias, ya que la base de datos del software solo posee concreto de resistencia $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$, o superiores. Finalmente se utilizó el proceso “*Concrete, 175 kg/cm2 {RoW} | concrete production 20MPa, RNA only | Alloc Def, U*”, en el cual se consideran las actividades desde la llegada de la materia prima a la planta de procesamiento de concreto y finalizan a la salida del concreto de planta. Es decir no se considera el traslado de este material a obra.

3.4.4. ACV de transporte de materiales

El modelamiento del transporte de los materiales de concreto y acero de refuerzo se realizará en dos escenarios. En primer lugar, se consideró el traslado de los vehículos (mixers de concreto y camiones) cargados con la cantidad de material según el volumen del pedido, desde la base de carga del camión hasta el lugar de la obra del edificio propuesto. En segundo lugar, el retorno de dichos vehículos es considerado sin carga, es decir, cada vehículo al retornar viajó completamente descargado. Se realizó esta diferencia debido a que el consumo de combustible fósil de estos vehículos varía según la cantidad de carga que transportan y, por ende, las emisiones de gases contaminantes son diferente para cada escenario.

En el caso del primer escenario, se tomó en consideración los envíos de los vehículos con sus respectivas cargas. La cantidad de envíos está en función al cronograma de pedidos de material (tanto de concreto como de acero de refuerzo), además cada vehículo enviado traslada una carga especificada según el cronograma de pedidos. Cabe resaltar que los cronogramas de pedidos de materiales y las cantidades de pedidos de materiales son diferentes entre cada método constructivo (tradicional y *Lean*).

Para el envío de concreto premezclado desde la planta de UNICON, se considerará al proceso, "Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3", establecido en el inventario transporte por carretera de la base de datos EcoInvent 3.

En el caso del envío de acero desde la planta de Aceros Arequipa, se consideró al proceso, "Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3", establecido en el inventario de transporte por carretera de la base de datos EcoInvent 3.

La unidad de estos procesos está expresada en T-Km: peso en toneladas del producto transportado multiplicado por el número de kilómetros que está siendo transportado. El cálculo de las t-km está expresado a través de la siguiente ecuación:

$$tkm = \sum_{i=1}^n xi(km) * yi(ton) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

X_i es la distancia en kilómetros que recorre el vehículo i .

Y_i es el peso del producto en toneladas que transporta el vehículo i .

En el caso del segundo escenario se buscará representar el retorno descargado de todos los vehículos de carga. El modelamiento de este proceso será distinto al del escenario anterior debido a que la base de datos utilizada no es capaz de calcular valores para vehículos cuyo recorrido lo realicen descargados.

Este proceso fue modelado sobre la base de los modelos pre-existentes de la base de datos de EcoInvent. Se utilizaron los mismos vehículos del escenario con vehículos cargados tanto para los *mixers* de concreto premezclado como para el de despacho de acero. Sin embargo, se modificaron los *inputs* originales de este proceso, debido a que en ese escenario se considera vehículos descargados. En lugar de los *inputs* originales, se insertaron de la *European Environment Agency* (EEA) las emisiones de gases de los vehículos en cuestión calculadas mediante el uso del reporte técnico N°12 de la guía de inventario de emisiones contaminantes, (Ntziachristos, L y Samaras, Z, 2014).

Ntziachristos, L y Samaras, Z, 2014 proponen una metodología para el cálculo de emisiones contaminantes de vehículos. La metodología distingue tres niveles de precisión de cálculo: (1) *Tier 1*, (2) *Tier 2*, y (3) *Tier 3*. Con cada uno de estos niveles se obtiene un estimado con mayor o menor precisión, según el método escogido, de los factores de emisión de contaminantes (CO, CO₂, NMVOC¹, NO_x, NH₃, entre otros) emitidos a través de los tubos de escape vehículos de carga que funcionan con diésel como combustible.

En el presente estudio se realizará el análisis de la emisión de contaminantes de vehículos descargados mediante el nivel *Tier 2*. Debido a que los datos proporcionados por este nivel de cálculo son más precisos y pueden asemejarse más al escenario que se intenta representar.

En el caso del nivel de precisión *Tier 2*, se considera el combustible usado por las diferentes categorías de vehículos y sus estándares de emisión por las cuales están regulados. Para el traslado de concreto, se escogió el llamado "*Heavy – duty vehicle*", con la legislación utilizada actualmente en el Perú: EURO III (MINAM, 2012). Tipo de combustible: Diesel. Peso bruto del vehículo entre 16 y 32 toneladas. En el caso del transporte de acero, se consideró el mismo tipo de vehículo, pero con pesos de entre 7.5 y 16 toneladas.

Las tablas utilizadas para obtener los factores de emisión por tipo de contaminante se encuentran adjuntas en el Anexo 02.

3.5. Simulación de la ejecución del proyecto

A continuación, se describirá el proceso por el cual se realizará la simulación de la ejecución de un proyecto a través de dos metodologías de producción: (1) Construcción tradicional – filosofía de producción tradicional; y (2) *Lean Construction* – filosofía de producción *Lean*

Para iniciar las simulaciones, se obtuvieron los entregables del proyecto (estructuras); además, se efectuó una sectorización del área en planta para llevar a cabo la ejecución. Cabe mencionar que la sectorización será distinta para ambas metodologías. Se elaboró un cronograma que represente la ejecución real del

¹ NMVOC: compuestos orgánicos volátiles distintos del metano

proyecto. Finalmente, se calcularon las cantidades de los materiales, las cuadrillas de trabajo y los cronogramas de abastecimiento

3.5.1. Simulación del proyecto según filosofía de producción tradicional

Los primeros proyectos en los que se implementó la filosofía *Lean Construction* en el Perú fueron ejecutados a fines de los años 90 y comienzos de los años 2000, aproximadamente una década después de que Lauri Koskela en el año 1992 estableciera los principios de *Lean Construction*, derivados del *Lean Production*. Previamente, el enfoque de producción en los proyectos de construcción era el del modelo de producción tradicional, es decir, producción basada en una suma de procesos de conversión. De manera que en el modelo de tradicional no se implementa ninguna herramienta del LPDS para la gestión del proyecto, ni del LPS para asegurar la efectividad y eficacia de la producción. Sobre esta base, se realizó un análisis de cada una de las fases del proyecto del caso de estudio.

La definición del proyecto no cuenta con el análisis detallado de restricciones, únicamente se tiene objetivos generales del proyecto, y los criterios de diseños no están alineados entre todos los involucrados. En el caso del modelo de construcción tradicional, la fase de diseño tiene un desarrollo muy superficial, es decir, se elaboran las especificaciones técnicas de cada especialidad sin ser compatibilizadas unas con otras, y al igual que en la fase de definición, los criterios de diseño no son alineados entre los involucrados.

La simulación de la ejecución según el modelo tradicional se llevó a cabo como una producción vista según un conjunto de suma de procesos. Dicha simulación fue presentada a través de un cronograma de trabajo que representa la ejecución del proyecto.

En adición, los rendimientos de todas las actividades programadas fueron obtenidos a través de ediciones pasadas de CAPECO (Ramos, 1991), documento de costos y presupuestos (Skoyles,1982) y mediante entrevistas con ingenieros que trabajaron con este modelo de producción. Con los rendimientos de las cuadrillas evaluadas, se obtiene luego la duración de cada actividad y se completa el cronograma. Finalmente, se obtuvieron las formas y métodos constructivos tradicionales a través de entrevistas semi-estructuradas con ingenieros y maestros de obra que trabajaron con esta metodología (I. Bragagnini, comunicación personal, 2015) y (M. Ruiz, comunicación personal, 2015).

En esta etapa se evidencia la carencia de herramientas del *Last Planner System* y otros elementos considerados actualmente. A continuación, en la Tabla 3.2 se muestra el grado de implementación de las herramientas del LPS en la construcción tradicional.

Tabla 3.2. Implementación de herramientas LPS en construcción tradicional

Herramientas LPS en el modelo tradicional	
Master plan	No se implementa
Lookahead	No se implementa
Plan semanal	No de manera formal
Programación diaria	No de manera formal
Análisis de restricciones /PPC	No se implementa
Control de materiales críticos	No se implementa
Just In Time (JIT)	No se implementa

Finalmente, en el sistema tradicional de construcción, el abastecimiento de materiales se daba de forma de forma no periódica y de manera masiva, es decir, en cada envío se procuraba enviar la mayor cantidad de material y con la menor frecuencia posible. De esta manera, se realizó una simulación del despacho de materiales y sus desperdicios para el caso de estudio, que al igual que en el caso de la simulación de la construcción, será presentado a través de un cronograma de abastecimiento.

3.5.2 Simulación del proyecto según filosofía *Lean Construction*

Se considera que la fase de definición del proyecto ha sido ejecutada de manera óptima, es decir, que se realizó el análisis de restricciones previas a la ejecución del proyecto, y de manera integral con los involucrados del proyecto se estableció los objetivos del proyecto y los criterios para el diseño.

En la etapa de diseño, para el caso de estudio según *Lean*, se considera que esta también se realizó de manera óptima, existiendo compatibilización entre las diferentes especialidades del proyecto. Asimismo, que las necesidades del proyecto (establecidas en la fase anterior) serán satisfechas a través del diseño del mismo, por lo que las especificaciones técnicas con las que se llevará a cabo la simulación son las definitivas y no sufrirán modificaciones posteriores. Por otro lado, en esta etapa se establecerá los criterios y herramientas que serán aplicadas para la ejecución del proyecto.

La etapa de abastecimiento se llevó de forma paralela a la ejecución del proyecto. Se considerará el enfoque de la filosofía *Lean* para el abastecimiento de materiales: Just in Time (JIT). De esta manera, se considerará varios despachos de materiales a la semana. La cantidad y frecuencia de envíos depende de la carga de materiales que sean requeridos para el uso inmediato. Asimismo, el abastecimiento de materiales está en relación al avance de la construcción de la obra, en ese sentido, el cronograma de envío de materiales para la simulación *Lean* está directamente relacionada al cronograma de ejecución.

Por otro lado, se establecieron estratégicamente los proveedores de materiales para optimizar los tiempos de envío de materiales, reducir las distancias de viaje de los vehículos de transporte, usar materiales de producción local y que sean según las especificaciones del proyecto.

La simulación de la ejecución según *Lean* será llevada a cabo con las herramientas del LPS. De acuerdo a esto para el tren de trabajo se estableció una serie de actividades repetitivas tanto para elementos verticales (muros) como para los horizontales (losas). Se establecerá un orden secuencial para estas actividades y se determinará cuadrillas de trabajo para llevar a cabo las tareas de manera paralela, es decir; elementos verticales y horizontales al mismo tiempo.

La planta típica del proyecto fue dividida en un número de sectores deberá ser igual al número de días de duración del tren de actividades. Por ejemplo, si el tren de actividades para 01 sector dura 6 días, entonces la planta deberá sectorizarse en 6 partes. Además se realizará iteraciones hasta obtener sectores en los cuales la carga de trabajo sea similar. Es decir, que se tenga la misma cantidad (o similar) de metraje en las especialidades de concreto, acero y encofrado.

Finalmente, siguiendo lo explicado en el capítulo de Estado del Arte, el punto más importante a tratar para lograr un sistema de producción eficiente y efectivo es lograr que el flujo de producción sea continuo; en base a esto, se asume el uso las herramientas *Lookahead* y *Pull Planning* y análisis de restricciones. Se realizaron en paralelo, teniendo un horizonte común de 4 semanas, en el cual teniendo un objetivo deseado común, se planificó de “adelante hacia atrás” dividiendo las partidas generales en más específicas e identificando las restricciones para cada una de las actividades. De esta forma, se obtiene una programación con menor variabilidad, y se logran asignar los recursos necesarios en el momento que se precisa.

3.5.3. Comparación entre metodologías

A través de ambas simulaciones se encontraron resultados diferentes que representaron la ejecución del proyecto según los lineamientos de cada filosofía de construcción. En ese sentido para ambos métodos, se analizó la duración de actividades, consumo de materiales y generación de residuos y la diferencia en los traslados de materiales. Esta última con el fin de calcular la generación de impactos ambientales y consumo de recursos por el transporte de los materiales de construcción. Esta comparación será la que finalmente compruebe o refute la hipótesis de que *Lean Construction* genera una menor huella medioambiental.

3.6. Caso de estudio

El caso de estudio es una vivienda multifamiliar ubicada en Chaclacayo, el cual es un edificio de ductilidad limitada (EDL), es decir, un edificio donde todos los muros y losas son de concreto armado de muy poco espesor (10 cms); que cuenta con 5 pisos más una planta de azotea, en los cuales se distribuyen 40 departamentos, 8 de los cuales son dúplex.

En la Figura 3.03 se observa un departamento típico de 71 m², que cuenta con un dormitorio principal, 02 dormitorios secundarios; 02 servicios higiénicos, sala – comedor, cocina y lavandería.



Figura 3.03.- Esquema de planta de unidad de vivienda típica de 71 m²

Asimismo, en la Figura 3.04 se observa la elevación frontal del edificio.



Figura 3.04.- Esquema de elevación frontal del edificio

Por otro lado, este tipo de edificación fue elegida debido a que, como se mencionó en el capítulo de Introducción, el Perú tiene un déficit de 1.8 millones unidades de viviendas, donde se estima que el mayor porcentaje de estas viviendas se derivan de familias de nivel socioeconómico B, C y D, que constituyen el 77% del total de la población (Apeim, 2015). Para satisfacer esta demanda, se construirán masivamente viviendas de ductilidad limitada debido a su bajo costo de construcción, rápida ejecución, y subvención del Estado para la adquisición de estos inmuebles, a través de programas como el Fondo Mi Vivienda, Bonos del Buen Pagador, entre otros.

Es por ello que es de suma importancia conocer el impacto ambiental positivo de construir este tipo de edificaciones de vivienda masiva con la metodología de producción *Lean Construction*, así como también, poder reconocer los puntos en los que se puede aplicar medidas correctivas o de mejora.

El tipo de cimentación utilizado, debido a la poca capacidad portante del suelo, es una platea con vigas de cimentación. El edificio tiene 6 niveles: un semisótano, 4 niveles y una azotea y tiene un área en planta típica de 635 m², aproximadamente. La etapa de construcción que se tomará en cuenta para la investigación es la de estructuras de concreto armado. Esta fase es escogida porque se puede estudiar y analizar mejor las diferentes filosofías de producción y métodos de construcción a estudiar.

3.6.1. Ubicación del proyecto

El proyecto está ubicado en Av. Los Riscos 166, Chaclacayo, Lima – Perú. A continuación se muestra en la Figura 3.05, la ubicación en un mapa de Google Maps.

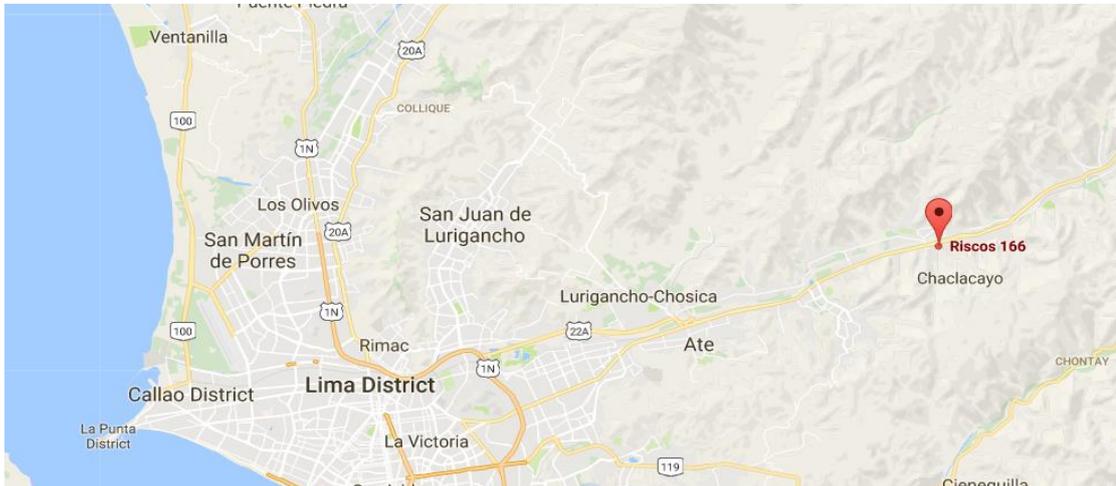


Figura 3.05.- Ubicación del proyecto (adaptado de Google Maps, 2017)

La planta de concreto premezclado que abastecerá al proyecto se encuentra en Huachipa. A continuación, en la Figura 3.06 se mostrará el trayecto de un mixer de concreto. Se observa que se tiene un recorrido de 17.6 kms. En contraste, la planta de acero que abastecerá al proyecto se encuentra en Santa Anita, como se muestra en la Figura 3.07, se observa que se tiene un recorrido de 22.5 kms.

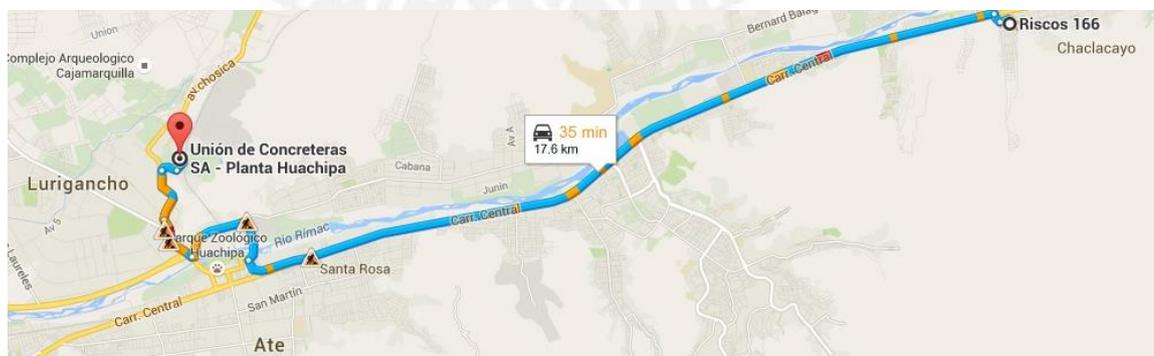


Figura 3.06.- Recorrido de un mixer desde planta a obra (adaptado de Google Maps, 2017)

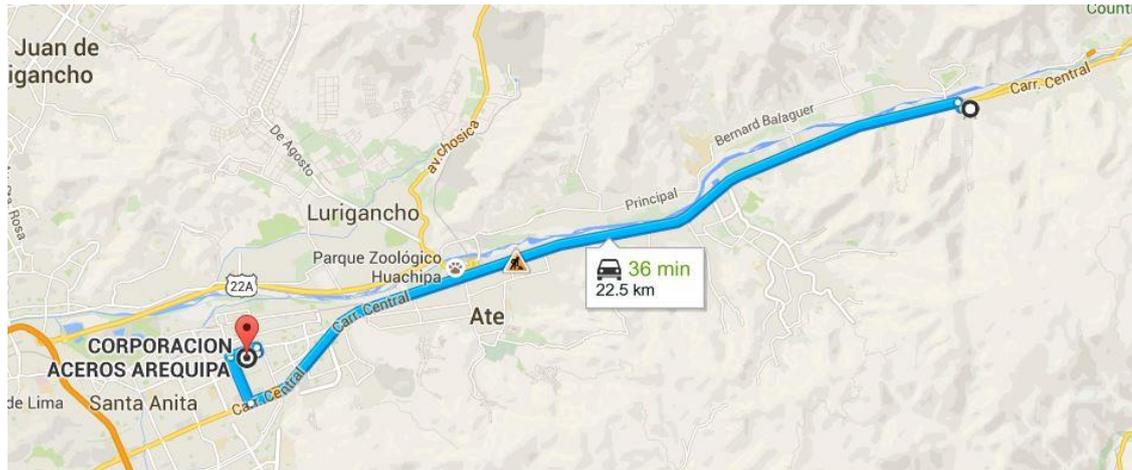


Figura 3.07.- Recorrido de un camión de acero desde planta a obra (adaptado de Google Maps, 2017)

3.7. Consideraciones generales

El propósito de la presente investigación es verificar si implementar la metodología Lean tiene efectos positivos sobre la sostenibilidad del rubro construcción, en comparación a la metodología tradicional. Es por ello que la simulación de la construcción se realizará considerando que la disponibilidad de recursos tecnológicos es la misma. Esto con el fin de que los resultados reflejen los beneficios propios de aplicar un sistema de gestión sobre otro.

En este sentido, se utilizará el mismo tipo de encofrado, madera. A pesar de que actualmente es mucho más común utilizar encofrado metálico. Asimismo, se considerará el uso de concreto premezclado. Por otro lado, para el ciclo de vida del caso de estudio, se considerará únicamente la etapa de construcción (pre uso). Ya que en las etapas posteriores no interviene de ninguna forma el uso de un sistema de gestión de la construcción.

Finalmente, se asocia el porcentaje de desperdicio de materiales obtenido a través de las encuestas y entrevistas, con el grado de implementación de *Lean Construction*; esto a pesar de que en diversos casos los encuetados indicaron haber utilizado paralelamente otras herramientas de gestión como BIM y/o PMI.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Resultados de la simulación de los métodos constructivos

4.1.1. Simulación según *Lean*

En primer lugar, se estableció un tren de trabajo, el cual busca representar el flujo de actividades necesarias para llevar a cabo la ejecución del casco de concreto armado del edificio. De esta manera, se puede observar en la Tabla 4.1, que se ha dividido el tipo de actividades en los siguientes: Elementos Verticales, que incluye las actividades necesarias para poder construir las placas de concreto, incluidas las instalaciones eléctricas y sanitarias; y Elementos Horizontales, que involucra las actividades necesarias para la construcción de losas de concreto armado.

Asimismo, en la Tabla 4.01, se puede observar que la duración de la construcción de un sector de la planta típica es de 6 días útiles (S1 equivale a Sector 1, S2 a Sector 2 y así sucesivamente). Por consiguiente, la sectorización de la planta está constituida por 6 sectores en los cuales la carga de trabajo es similar. De esta manera se logró un flujo de trabajo productivo continuo. Por el contrario, si se hubiera decidido por sectorizar la planta en un número distinto de partes al número de días que dura el tren (es decir, un número distinto de 6) se obtendrían puntos en los que las distintas cuadrillas no pueden acceder a sus áreas de trabajo por falta de conclusión en las actividades previas, y por ende incurriríamos en pérdidas por deficiencia en el flujo productivo.

Tabla 4.01. Tren de actividades para una planta típica según *Lean*

ACTIVIDADES		DÍAS					
		1	2	3	4	5	6
Elementos Verticales	1. Trazo	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	2. Acero Vertical	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	3. IIEE/IISS		S1	S2	S3	S4	S5
	4. Encofrado Vertical			S1	S2	S3	S4
	5. Concreto Vertical			S1	S2	S3	S4
Elementos horizontales	6. Encofrado				S1	S2	S3
	7. Acero				S1	S2	S3
	8. IIEE/IISS					S1	S2
	9. Concreto						S1

A continuación, en la Tabla 4.02, se presenta la carga de trabajo por sector de planta típica en el cual se muestra el metrado de las especialidades de encofrado, habilitación y colocación de acero y vaciado de concreto, por cada sector de un piso típico, tanto para elementos verticales (muros) y elementos horizontales (losa maciza).

Se puede observar que para cada sector se tiene una carga de trabajo similar para cada especialidad. Estos volúmenes similares de trabajo permiten que cada cuadrilla tenga un trabajo repetitivo, con carga constante y pueda presentar una curva de aprendizaje positiva. Es decir, de esta manera se logra que cada cuadrilla con el pasar de los días se vuelva más eficiente para producir.

Tabla 4.02. Carga de trabajo por especialidad en cada sector de planta típica

	Elementos verticales			Elementos horizontales		
	Encofrado (m ²)	Acero (Ton)	Concreto (m ³)	Encofrado (m ²)	Acero (Ton)	Concreto (m ³)
SECTOR 1	281.82	1.13	13.54	112.23	1.09	11.22
SECTOR 2	259.67	1.04	12.41	110.21	1.07	11.02
SECTOR 3	317.71	1.27	15.59	93.7	0.91	9.37
SECTOR 4	422.35	1.69	21.45	94.58	0.92	9.46
SECTOR 5	281.82	1.13	13.54	112.23	1.09	11.22
SECTOR 6	259.67	1.04	12.41	110.21	1.07	11.02

Por otro lado, también se realizó una sectorización de 6 partes similares para la ejecución de la cimentación, la cual está constituida por vigas de cimentación y una platea. Se consideró una división en 6 partes ya que el tren de actividades de cimentación empalma directamente con el tren de las estructuras del edificio. En la Tabla 4.3. se puede observar los metrados obtenidos para la cimentaciones. Cabe mencionar que debido a la simetría en la planta del caso de estudio, la división de la sectorización resultó en partes idénticas.

Tabla 4.03. Carga de trabajo por especialidad en cada sector de la cimentación

	Cimentación	
	Acero (Ton)	Concreto (m ³)
SECTOR 1	2.054	24.105
SECTOR 2	2.054	24.105
SECTOR 3	2.054	24.105
SECTOR 4	2.054	24.105
SECTOR 5	2.054	24.105
SECTOR 6	2.054	24.105

En la Figura 4.01 se puede observar, el resultado de la sectorización de la planta típica. Como se mencionó, se dividieron las plantas en 6 partes, de manera que se logre en primer lugar un flujo de producción continuo y eficiente, conseguir cargas de trabajo similares, lograr un tren de trabajo repetitivo y, finalmente, lograr una curva de aprendizaje en los trabajadores.

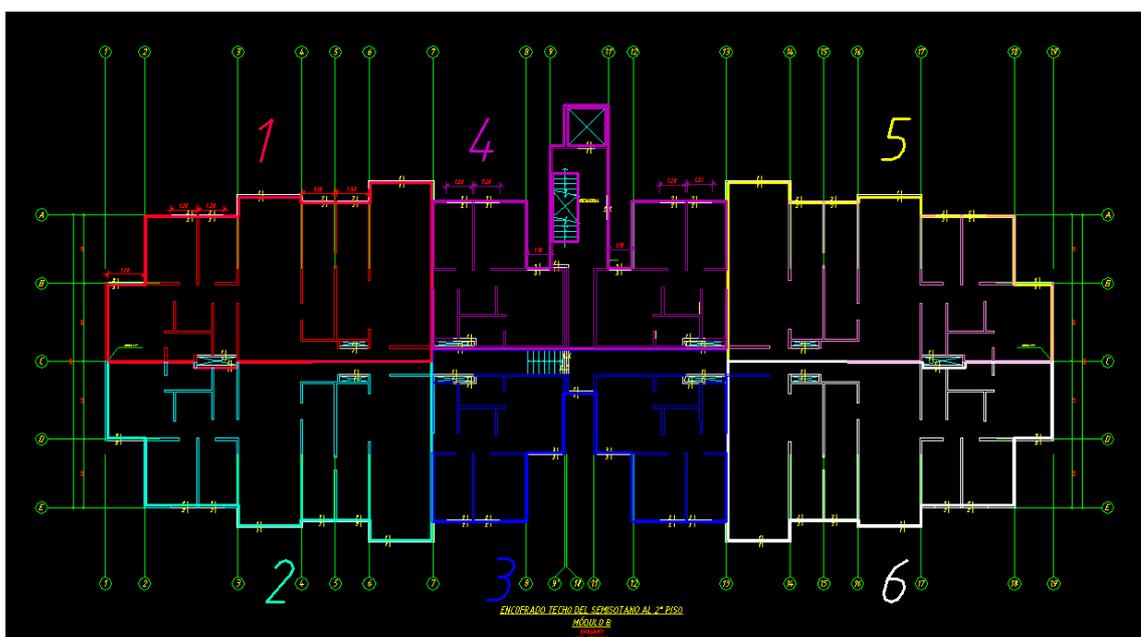


Figura 4.01.- Sectorización de la planta típica

Por otro lado, en la Figura 4.02 se presenta la sectorización de la cimentación. Como se mencionó esta fue dividida en 6 partes de igual manera que la sectorización de las plantas del edificio, esto con el fin de que ambos trenes de trabajo puedan ejecutarse uno tras otro.

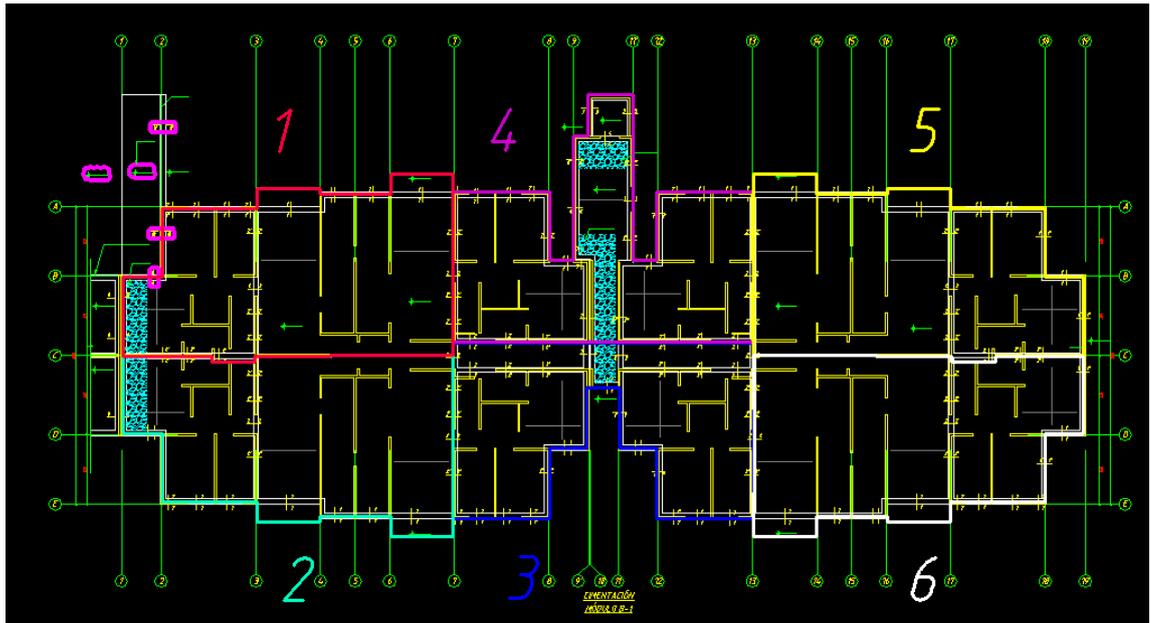


Figura 4.02.- Sectorización de la cimentación

Asimismo, se realizó la sectorización del techo de la planta de azotea. La cual es visiblemente menor que la planta típica. Es por esta razón, que se decidió dividir la planta en sólo dos sectores. Esto se puede observar en la Figura 4.03.

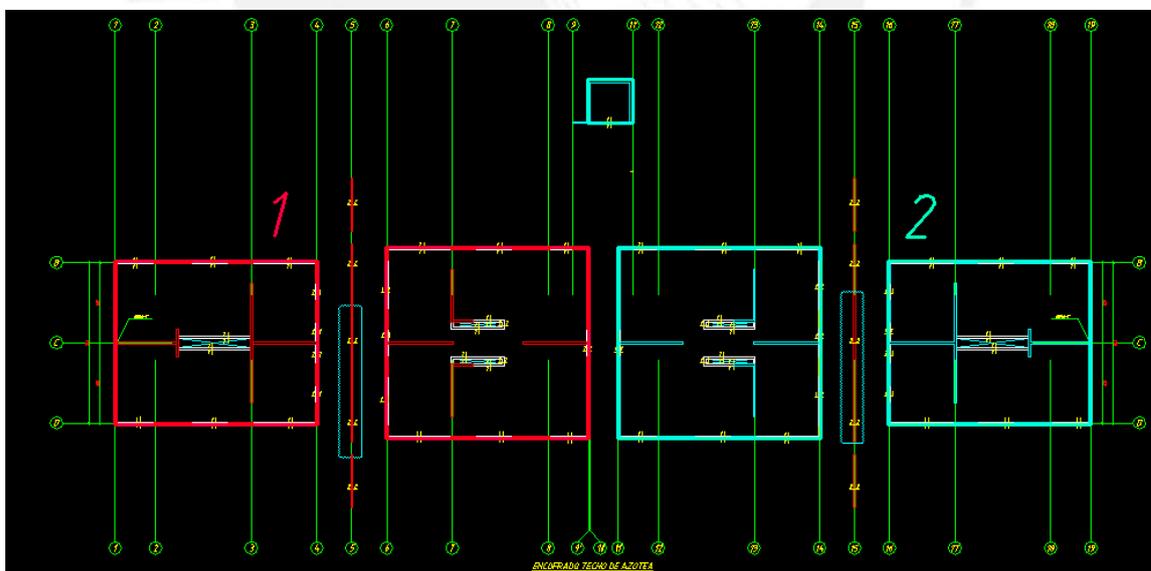


Figura 4.03.- Sectorización de la azotea

Por otro lado, en el Anexo N° 03, se presenta el cronograma obtenido tras realizar la simulación de la ejecución del edificio propuesto. En dicho cronograma se puede observar la presencia de un flujo continuo de trabajo, desde la etapa de cimentación

hasta el vaciado de concreto y desencofrado de las estructuras que conforman la azotea.

Por otro lado, el cronograma de trabajo está constituido por actividades que son ejecutadas de lunes a viernes. Los días sábados, por ser medio día laboral, están considerados como buffers de tiempo. Estos son utilizados para evitar que la variabilidad inherente a la actividad constructiva afecte al cronograma de trabajo establecido, ya sea por retrasos o por menor cantidad de trabajo ejecutado. En la Tabla 4.04, se observa un resumen del cronograma final.

Tabla 4.04. Características cronograma según *Lean Construction*

Tiempo de ejecución (etapa de estructuras)	46 días útiles
Fecha de inicio	01/05/2017
Fecha fin	26/06/2017
Duración de excavación y cimentación	9 días útiles
Duración de construcción de estructuras	37 días útiles

Para cumplir con el cronograma de trabajo se requirió el ingreso de mano de obra especializada en concreto, encofrado y acero. A continuación, se presentarán las Figuras 4.04, 4.05 y 4.06 en los cuales se representan la cantidad de personal obrero requerida para cumplir con los cronogramas de trabajo y la carga de trabajo obtenida por la sectorización.

En la Figura 4.04 se puede observar la cantidad de personal de la cuadrilla de concreto. Asimismo, se observa que existen dos curvas. La de color azul representa la curva teórica, es decir, la curva obtenida a través de los ratios teóricos para la carga de trabajo. La curva color rojo se representa la cantidad de personal estable con la que se ejecutará el proyecto.

Adicionalmente, en la Tabla 4.05 se muestran los ratios (horas hombre por unidad de avance) utilizados para obtener la cantidad teórica de personal para cada frente de trabajo. Cabe mencionar, que estos rendimientos se obtuvieron de la experiencia propia de los autores y de los rendimientos promedio para este tipo de edificaciones.

Tabla 4.05. Ratios empleados para dimensionamiento de cuadrillas

Cuadrilla	Ratio	Unidad
Concreto para Cimentación	1.342	hh/ m ³
Concreto para Muros	1.342	hh/ m ³
Concreto para Losas	1.969	hh/ m ³
Colocación de acero	0.045	hh/kg
Encofrado y desencofrado de Muros	0.48	hh/ m ²
Encofrado de losa	0.42	hh/ m ²

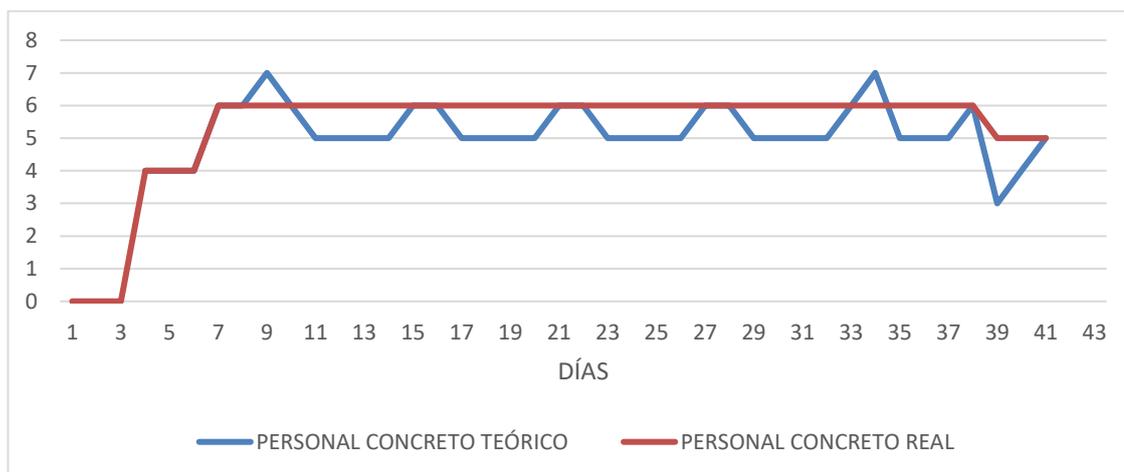


Figura 4.04. Curva de personal – Especialidad Concreto

De la misma manera, en la Figura 4.05 se muestra la cantidad de personal para realizar la colocación de acero tanto para elementos verticales, horizontales y cimentación. En este caso, se puede observar que en promedio se consideraron 12 obreros.

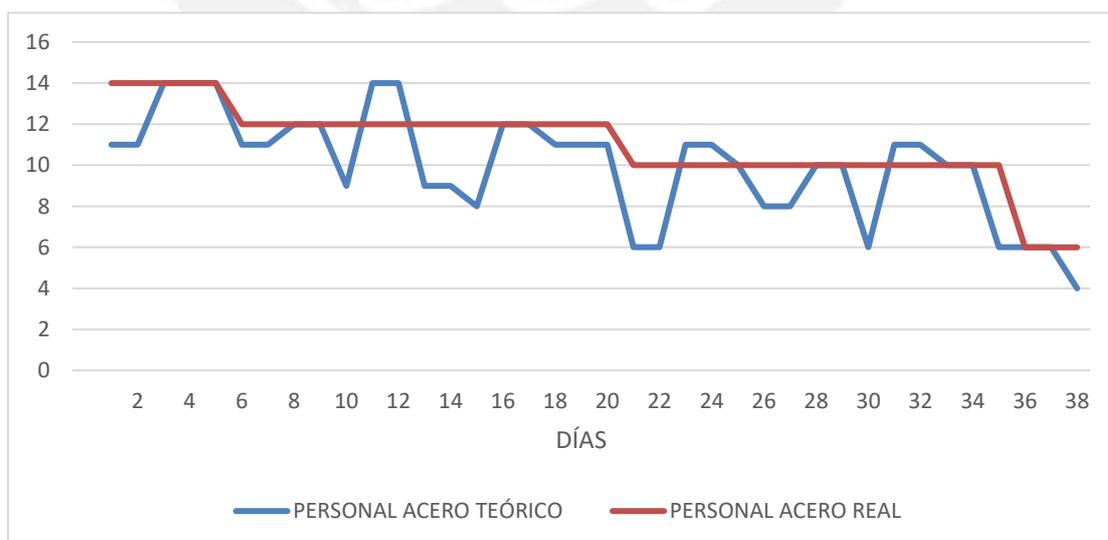


Figura 4.05. Curva de personal – Especialidad Acero

En adición, en la Figura 4.06. se observa la curva de personal para la especialidad de encofrado, tanto de verticales (muros), horizontales (losa y escaleras).

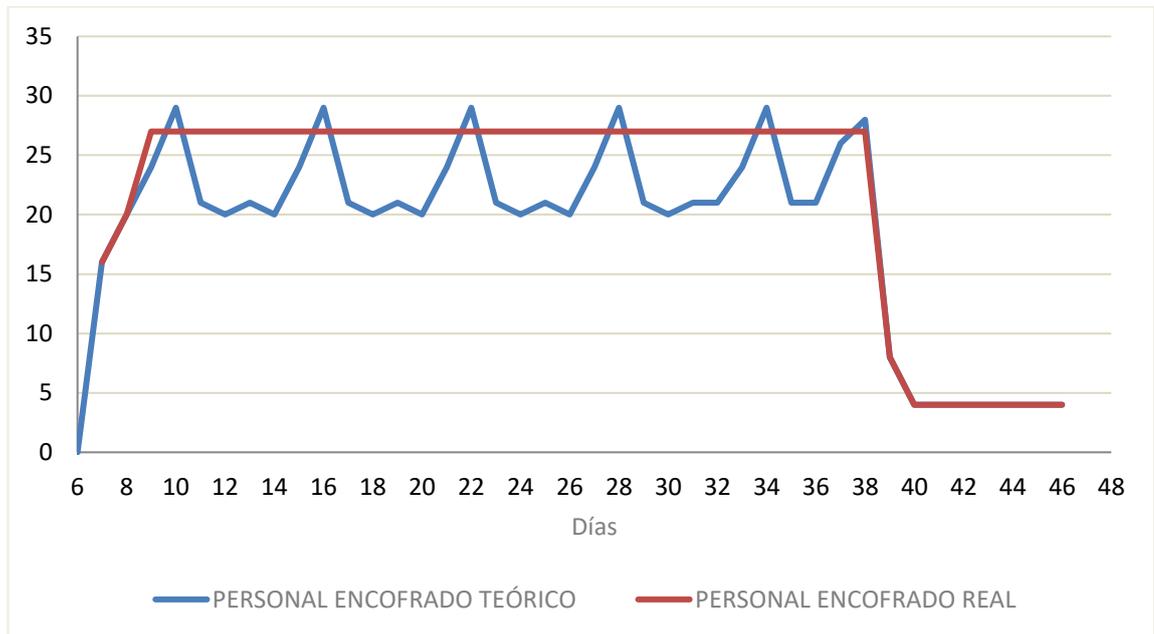


Figura 4.06. Curva de personal – Especialidad Encofrado

Finalmente, el cronograma de envío de materiales Lean se obtuvo del análisis del cronograma general de obra. En el caso del concreto, los *mixers* son pedidos para el mismo día de vaciado de concreto; mientras que los camiones de acero son solicitados por lo menos 1 o 2 días antes de que se requiera su colocación en el respectivo sector.

En el Anexo N° 04, se puede observar el cronograma con el cual se despachan los *mixers* de concreto de acuerdo al cronograma de ejecución, desde la planta de concreto premezclado a la ubicación del proyecto. Los volúmenes despachados corresponden a los vaciados programados para cada sector, tanto de elementos verticales como de horizontales.

En la Figura 4.07 se muestra el volumen pedido diario de concreto premezclado. Se observa que para culminar con la etapa de estructuras del edificio estudiado requiere de 38 días de vaciado. Durante los días 7 – 11, se obtiene mayor volumen de concreto ya que durante estos días se vacía sectores de cimentación y sectores de muros verticales.

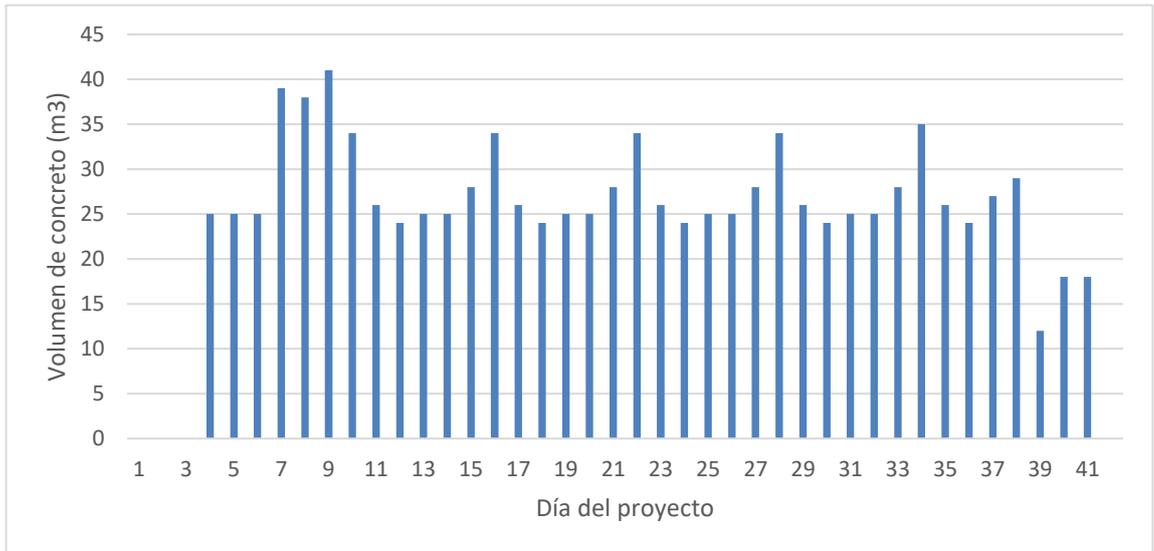


Figura 4.07. Volumen de concreto premezclado cada día

Por otro lado, las características de los camiones de concreto y su recorrido se muestran en la tabla 4.06.

Tabla 4.06. Características de *mixers* y ubicación de planta

Peso Bruto	14 ton
Peso Total	32 ton
Recorrido de planta a obra	17.6 km
Volumen máximo de carga	8 m ³

En la tabla 4.07 se obtienen los resultados tras analizar el cronograma de despachos de concreto

Tabla 4.07. Resultados del cronograma de despacho de concreto

Volumen de concreto total despachado	1019 m ³
Número total de <i>mixers</i> despachados	152 unidades
Total de kilómetros recorridos (unidades cargadas)	2675.2 km
Total de kilómetros recorridos (unidades descargadas)	2675.2 km

En el Anexo N° 05, se observa el cronograma con el cual se despachan los camiones que cargan el acero de refuerzo de losas y muros estructurales. Estos son enviados desde la planta de despacho de acero, ubicada en Santa Anita, a 22.5 km del proyecto. Los despachos de acero para *Lean* son considerados 3 veces por semana, y están acorde al cronograma de trabajo, de tal manera que el acero de sector es abastecido por lo menos 1 día antes de que la cuadrilla de acero trabaje en dicho sector.

En la Figura 4.08 se muestra la cantidad de despachos de acero y la cantidad en toneladas de acero enviado. Se observa que se realizó 23 envíos de acero, 3 veces por semana: lunes, miércoles y viernes. Los volúmenes de acero son despachados según el cronograma de trabajo para que en ningún momento las cuadrillas estén desabastecidas. Las características de los camiones que fueron considerados para el transporte del acero se muestran en la tabla 4.08.

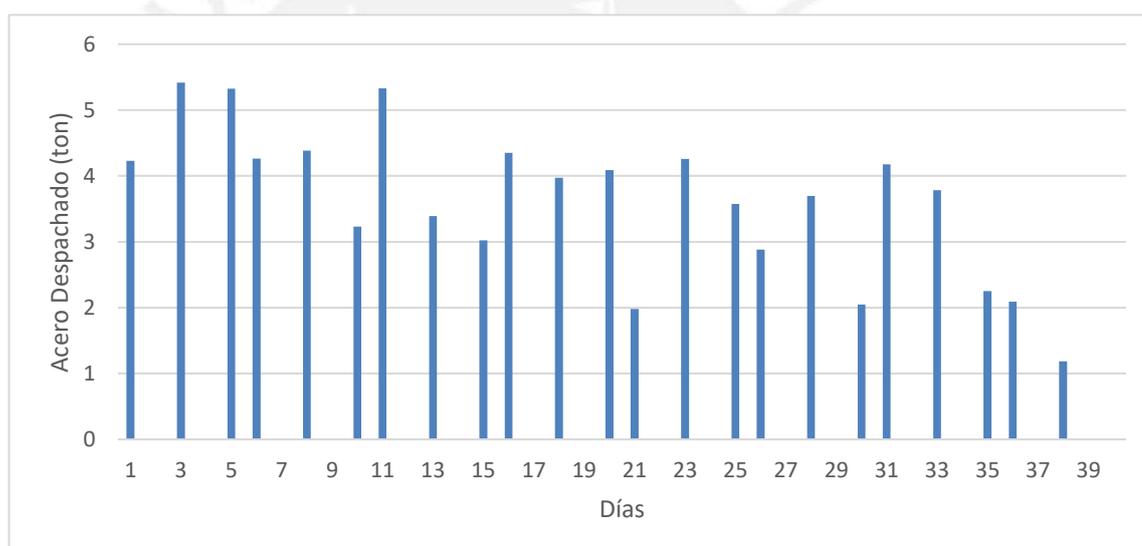


Figura 4.08. Toneladas de Acero enviadas

Tabla 4.08. Características de camiones transportadores de acero

Peso Bruto	7.5 ton
Peso Total	14 ton
Recorrido de planta a obra	22.5 km

De la misma manera, en la Tabla 4.09 se puede observar los resultados tras analizar el cronograma de despacho de acero de refuerzo.

Tabla 4.09. Resultados del cronograma de despacho de acero

Peso total del acero despachado	82.9 ton
Número total de despachos (unidades despachadas)	23 unidades
Total de kilómetros recorridos (unidades cargadas)	517.5 km
Total de kilómetros recorridos (unidades descargadas)	517.5 km

4.1.1. Simulación según metodología tradicional

A diferencia del sistema constructivo con *Lean Construction*, la forma tradicional de construcción no aplica de manera formal ninguno de los 11 principios fundamentales propuestos por Lauri Koskela (1992), es decir, no se busca reducir las actividades que no generan valor, ni se busca maximizar el valor para el cliente, no se identifica ni se reduce la variabilidad inherente a las actividades constructivas.

Por el contrario, la metodología tradicional tiene sus propios principios con los cuales se realiza la ejecución del proyecto. En este sentido, las actividades productivas son concebidas como un conjunto de actividades independientes. Por lo tanto, existe la carencia de cuadrillas de trabajo que trabajen de manera constante y con una sectorización adecuada que permita que se produzca un flujo continuo y eficiente de producción.

A diferencia del caso *Lean*, en el método tradicional, la planta de trabajo no está propiamente sectorizada. En la práctica se buscaba realizar trabajos de forma masiva, es decir, vaciados de losas enteras que podían durar todo el día. Sin embargo, para el caso práctico del estudio, la planta típica del edificio se dividió en dos partes iguales ya que, por su extensión, no hubiera sido factible realizar un solo vaciado masivo.

Las características de la ejecución del trabajo que serán tomadas en cuenta para elaborar el tren de trabajo son las siguientes: en primer lugar, la planta se dividió en dos partes iguales, debido a su gran extensión. 320 m² cada uno. Asimismo, se considera 02 cuadrillas que trabajan de manera paralela en ambos sectores. Finalmente, no existen cuadrillas especializadas, es decir, todos los operarios

trabajan de manera secuencial, primero en la colocación de acero, encofrado y finalmente en el vaciado de concreto.

En ese sentido, en la Tabla 4.10 se muestra el tren de trabajo típico, para la construcción del edificio sectorizado en dos partes. Se puede notar que existen periodos en los que se tiene baja productividad, es decir, el tren de trabajo no establece un flujo continuo de producción. Sin embargo, esto es característico de este tipo de metodología de construcción, en las que no se enfoca en el flujo si no tan solo en proceso de conversión. Por otro lado, se puede notar de la tabla 4.07 que la construcción de un piso típico tarda 15 días.

Tabla 4.10 Tren de actividades típicas según la metodología tradicional

ACTIVIDADES \ DIAS		SEMANA 1					SEMANA 2					SEMANA 3				
		L	M	X	J	V	L	M	X	J	V	L	M	X	J	V
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VERTICALES	TRAZO	S1					S2									
	ACERO		S1	S1				S2	S2							
	IIIEE/IISS		S1	S1				S2	S2							
	ENCOFRADO			S1	S1				S2	S2						
	CONCRETO					S1					S2					
	DEENCOFRADO						S1	S1				S2	S2			
HORIZONTALES	ENCOFRADO						S1	S1				S2	S2			
	ACERO								S1	S1				S2	S2	
	IIIEE/IISS								S1	S1				S2	S2	
	CONCRETO										S1					S2
	DEENCOFRADO															

A continuación, en la Tabla 4.11, se presenta el metrado de las especialidades de encofrado, habilitación y colocación de acero y vaciado de concreto, por cada sector de un piso típico, tanto para elementos verticales (muros) y elementos horizontales (losa maciza).

Se observa que el sector 1 tiene una ligera mayor carga de trabajo que el sector 2, esto se debe a que dentro del primer sector se considera la zona del ascensor, que por razones constructivas y estructurales no puede tener juntas frías por vaciados en fechas distintas. Esto ocurre tanto en los vaciados de elementos verticales como horizontales.

Así mismo, se presenta la Tabla 4.12, en la cual se muestra la carga de trabajo para la cimentación. La cual fue dividida de la misma manera en dos partes.

Tabla 4.11. Carga de trabajo por especialidad en cada sector de planta típica caso tradicional

	Elementos verticales			Elementos horizontales		
	Encofrado (m ²)	Acero (Ton)	Concreto (m ³)	Encofrado (m ²)	Acero (Ton)	Concreto (m ³)
SECTOR 1	1002.67	3.92	46.69	352.31	3.32	33.94
SECTOR 2	820.37	3.54	42.24	288.25	3.01	30.71

Tabla 4.12. Carga de trabajo por especialidad en cada sector de la cimentación caso tradicional

	Cimentación	
	Acero (Ton)	Concreto (m ³)
SECTOR 1	6.470	75.93
SECTOR 2	5.854	68.70

A diferencia del caso Lean, la sectorización no se da por un resultado de iteraciones con el objetivo de lograr flujos de trabajos eficientes, ni cargas de trabajo similares; en este caso la sectorización es consecuencia de las prácticas tradicionales y experiencia de los encargados de la construcción del proyecto.

En la Figura 4.09 se observa el resultado de la sectorización para una planta típica. Se observa que el primer sector es aquel que abarca la zona del hall de ascensores, por esta razón los metrados resultaron mayores. Asimismo, en las Figura 4.10 se observa la sectorización para el nivel de cimentación, y en la Figura 4.11, el nivel de azotea. Esta última ha sido sectorizada de la misma manera que en el caso Lean.

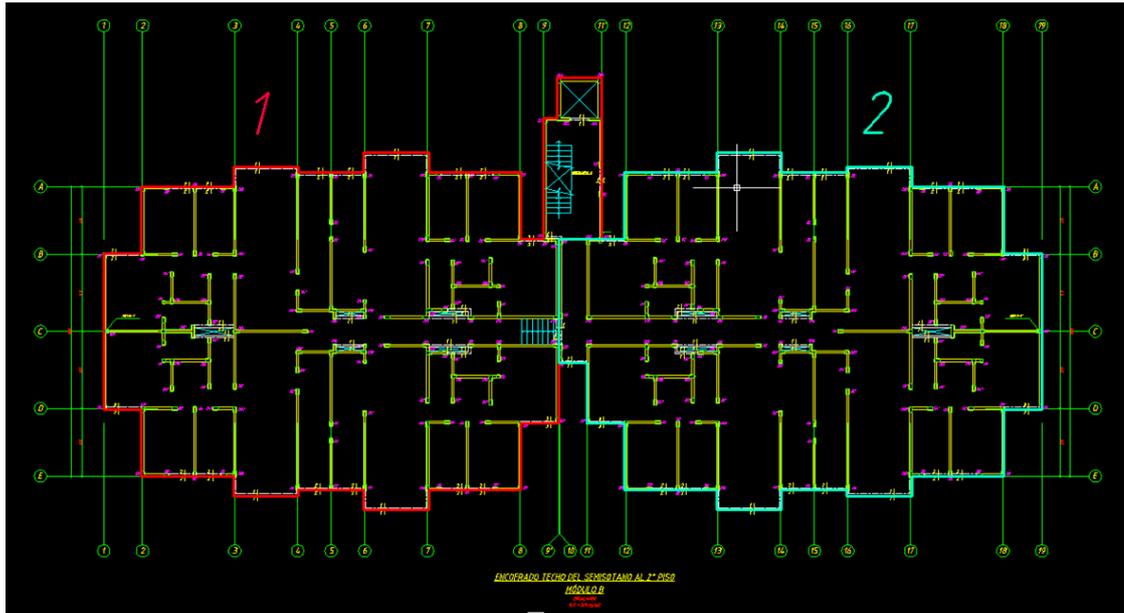


Figura 4.09.- Sectorización de planta típica

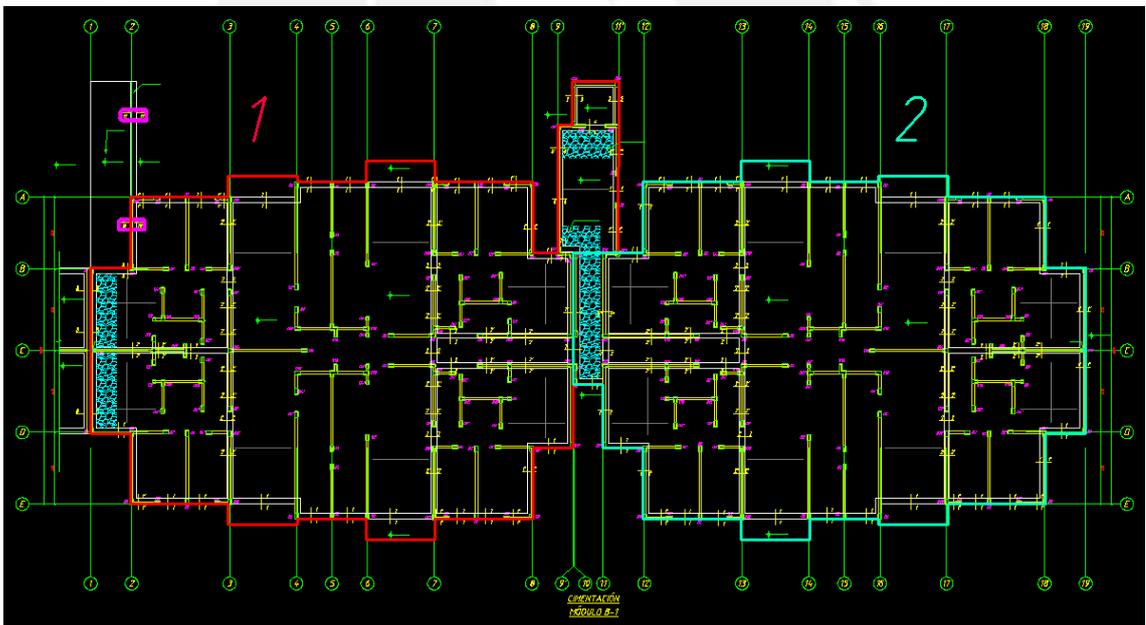


Figura 4.10.- Sectorización de cimentación

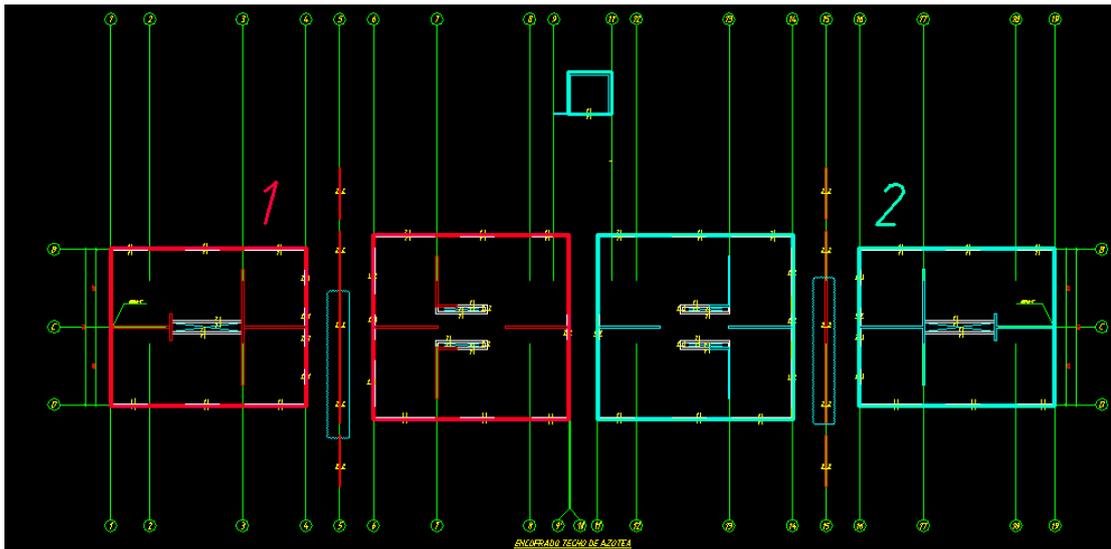


Figura 4.11.- Sectorización de la azotea

Por otro lado, en el Anexo N° 06, se presenta el cronograma obtenido tras realizar la simulación de la ejecución del edificio propuesto. Se puede observar en el cronograma tradicional que la programación está basada en dos sectores. A diferencia del caso tradicional, se observa que no existe un flujo de producción continuo, es decir, se observa que no existen trabajos repetitivos ni rutinarios.

Se observa que ninguna de las actividades de topografía, concreto, acero ni encofrado tienen actividades periódicas. De esta manera, no se permite aprovechar la curva de aprendizaje de las actividades repetitivas, ya que no hay cuadrillas específicas y el personal debe trabajar en la actividad crítica del momento.

Asimismo, se considera dos grandes cuadrillas de trabajo. Cada una de ellas dedicada a la labor de trabajo en cada uno de los 2 sectores. Como se mencionó, la práctica regular tradicional es realizar un único gran vaciado, sin embargo, por las dimensiones de la planta esto no es factible, por ello se consideró 2 sectores y 2 grupos de trabajo independientes para cada frente. Siguiendo esta sectorización, el resumen del cronograma final se detalla en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Resumen del cronograma según la metodología tradicional

Tiempo de ejecución (etapa de de estructuras)	78 días útiles
Fecha de inicio	01/05/2017
Fecha fin	16/08/2017
Duración de excavación y cimentación	11 días útiles
Duración de construcción de estructuras	67 días útiles

A diferencia de la simulación *Lean*, obtener el flujo de personal con el método tradicional es de mayor dificultad ya que no se puede establecer el flujo según cada partida ya que se tiene varios valles y picos por actividad, especialmente en el caso del concreto. Por esta razón, y considerando el supuesto de que no existen cuadrillas especializadas, se obtiene una curva de personal generalizada, buscando cubrir la demanda de todos los trabajos. La Figura 4.12 muestra la distribución del personal a lo largo del proyecto.

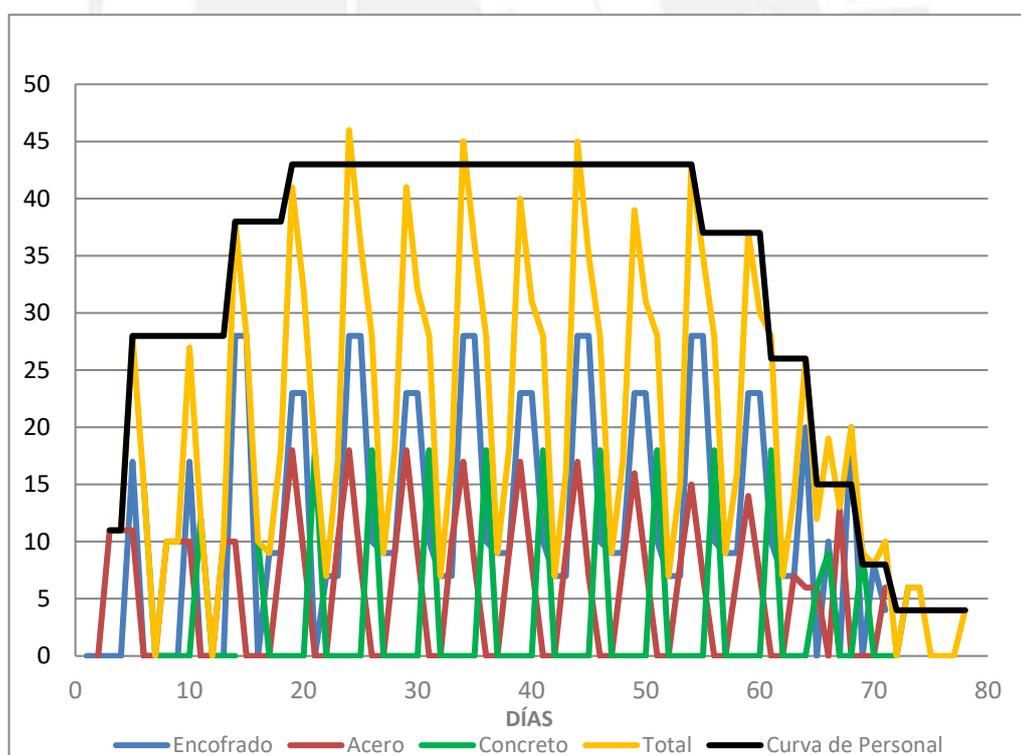


Figura 4.12. Curva de personal método tradicional.

En la Figura 4.12 se observan varios momentos en los cuales el personal está sobredimensionado para las actividades que se deben realizar; sin embargo, este debe poder soportar las cargas de trabajo en los momentos más críticos. Además, se puede apreciar que, en los días de vaciado de concreto, la curva tiene un valle considerable, lo cual es debido a que ese día las actividades productivas se centran en el vaciado de concreto y desencofrado.

El pico del proyecto son 43 trabajadores los cuales se distribuyen en la parte central y gruesa del mismo y termina con 4 los cuales son los encargados de desencofrar el segundo sector de la azotea.

Finalmente, para el caso tradicional, los despachos de materiales se realizan con poca frecuencia, pero con grandes volúmenes de despacho. Cabe resaltar que al considerar igualdad tecnológica, los detalles de los *mixers*, camiones para el transporte de acero y ubicación de las respectivas plantas de distribución de material son iguales para ambas metodologías.

En el anexo N° 07, se puede observar el cronograma con el cual se despachan los *mixers* de concreto de acuerdo al cronograma de ejecución del modelo tradicional, desde la planta de concreto premezclado a la ubicación del proyecto.

En la Figura 4.07 se observa el volumen de concreto solicitado a la planta de concreto premezclado para cada día de vaciado. A diferencia del caso Lean, según la metodología tradicional se realizan vaciados masivos y con menor frecuencia, es decir, estos no se daban de manera diaria. Con esta metodología, se obtuvo solamente 16 días de vaciados. Para realizar dichos vaciados fue necesario trasladar un total de 1033 m³ de concreto.

En la Figura 4.13 se muestra el volumen pedido diario de concreto premezclado. Se observa para culminar con la etapa de estructuras del edificio propuesto se requiere de 38 días de vaciado. Durante los días 7 – 11, se obtiene mayor volumen de concreto ya que durante estos días se vacía sectores de cimentación y sectores de muros verticales.

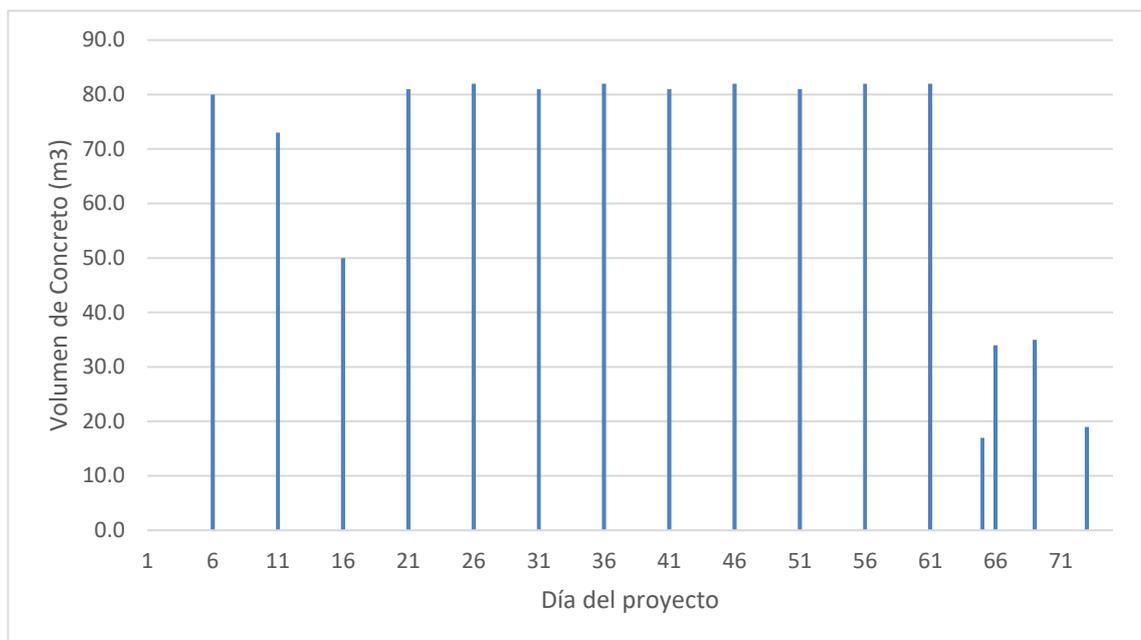


Figura 4.13 Volumen de concreto pedido diario

En la Tabla 4.14 se presentan los resultados tras analizar el cronograma de despachos de concreto

Tabla 4.14. Resultados del cronograma de despacho de concreto

Volumen de concreto total despachado	1042 m ³
Número total de mixers despachados	142 unidades
Total de kilómetros recorridos (unidades cargadas)	2499.2 kms
Total de kilómetros recorridos (unidades descargadas)	2499.2 kms

Asimismo, en el Anexo N° 08, se observa el cronograma con el cual se despachan los camiones que cargan el acero de refuerzo de losas y muros estructurales. Estos son enviados desde la planta de despacho de acero, ubicada en Santa Anita, a 22.5 km del proyecto. En el caso de la simulación tradicional, los envíos de acero se realizan de manera masiva con muy poca frecuencia. En este sentido, se realizan solamente 6 veces a lo largo de todo el proyecto. La cantidad de acero de refuerzo despachada (expresada en toneladas) representa la cantidad de acero requerida para trabajar 2 semanas, es por ello que los despachos se consideran quincenales.

La Figura 4.14 muestra los 6 días de despacho de acero, y la carga total de acero despachado por día. En el primer envío se considera la cantidad de acero para la cimentación y para el nivel semisótano. Considerando que estos niveles tienen mayor cantidad de acero y varillas más gruesas, se obtiene una cantidad de acero superior. Incluso para trasladar esta cantidad, se requiere de dos vehículos.

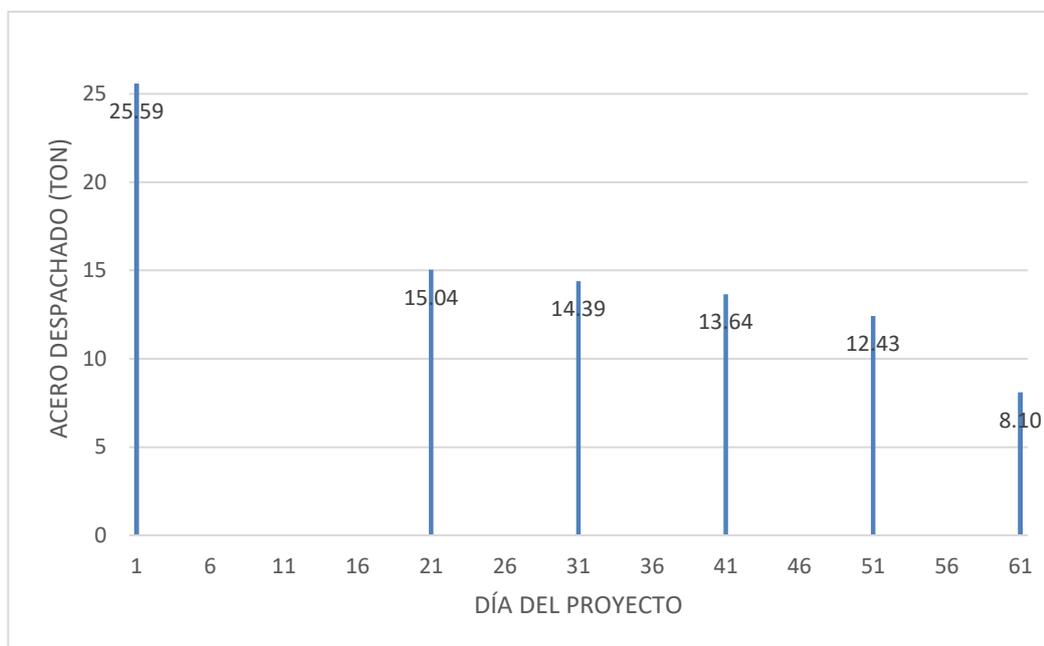


Figura 4.14. Toneladas de Acero enviadas

De la misma manera, en la Tabla 4.15 se puede observar los resultados tras analizar el cronograma de despacho de acero de refuerzo.

Tabla 4.15 Resultados del cronograma de despacho de acero

Peso total del acero despachado	89.2 ton
Número total de despachos (unidades despachadas)	7 unidades
Total de kilómetros recorridos (unidades cargadas)	157.5 kms
Total de kilómetros recorridos (unidades descargadas)	157.5 kms

4.2. Comparación de resultados

En primer lugar, la duración del tiempo de ejecución del proyecto varía entre una metodología y otra por dos razones: la primera de ellas es debido a que el sistema de gestión *Lean* permite emplear herramientas y conceptos que favorecen el flujo de producción y reducen los tiempos muertos (o pérdidas); esto se aprecia de mejor manera en las tablas 4.01 y 4.10, donde se observa que para *Lean* las actividades tienen menor duración, debido a que son sectores más pequeños, y no hay tiempos muertos entre ellas. La segunda razón, es que debido a la gestión y control *Lean* la cantidad de material a procesar se reduce y se tiene menor cantidad de desperdicio.

- Duración de la ejecución según *Lean*: 46 días útiles
- Duración de la ejecución según Tradicional: 78 días útiles

Desde el punto de vista económico, la duración según la metodología *Lean* permite, en primer lugar, entregar el proyecto más rápido al cliente, tener mayor control en caso de imprevistos (uso de buffers de capacidad), y finalmente, reducir gastos generales y mano de obra.

Por otro lado, en cuanto a la mano de obra requerida para la ejecución, se tiene que la curva de ingreso de personal (es decir, el personal requerido para llevar el cronograma de ejecución) según *Lean* es más regular y no tiene puntos altos y bajos repentinos, como se puede observar en las Figuras 4.04, 4.05 y 4.06. Es decir, la buena programación de actividades a futuro (*Lookahead*) y la sectorización del área de trabajo permiten llevar una mejor programación del personal de mano de obra.

Asimismo, cabe mencionar que en el caso *Lean* se tienen cuadrillas específicas quienes van mejorando con el pasar de los días ya que van logrando una curva de aprendizaje. Por el contrario, en el caso de la metodología tradicional, es costumbre tener un conjunto de personas cuyas actividades no son específicas, sino que, de manera grupal iban trabajando en las tareas que se requieran en el día a día. Finalmente, en la Figura 4.15 se tiene la cantidad horas hombre utilizadas en ambos casos.

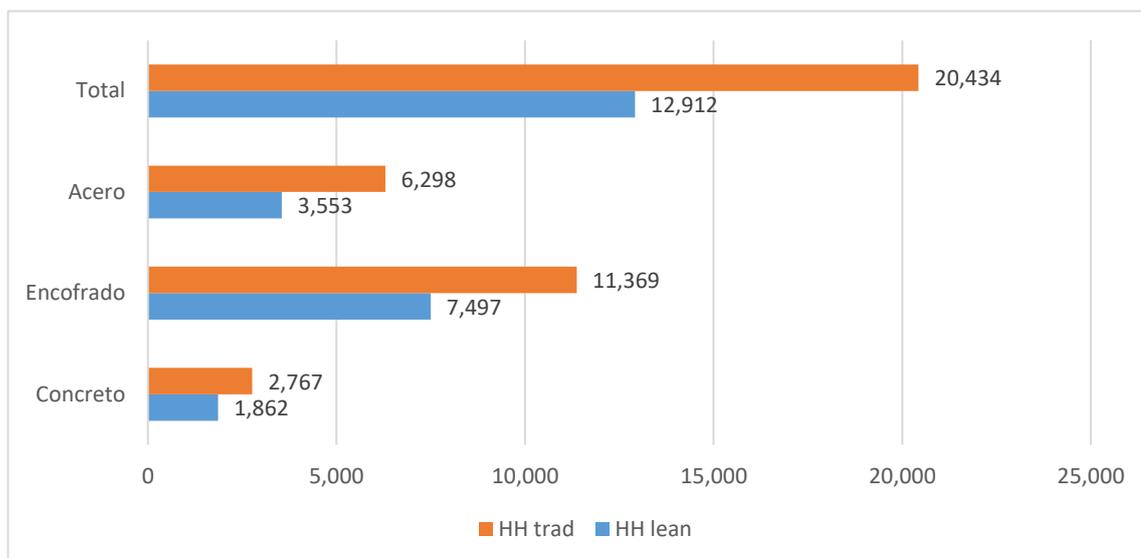


Figura 4.15. Comparación de Horas Hombre empleadas por cada metodología

De la Figura 4.15 podemos observar que la metodología Lean permite gestionar de manera más eficiente el recurso mano de obra, de esta manera, no sólo se completa el proyecto en menos días, sino que también se reduce la cantidad de horas hombre en un 37% aproximadamente.

4.3. Efectos en el medio ambiente

Los resultados obtenidos se han dividido en 2 partes principales: impactos causados por la producción del material y por su transporte hasta el lugar del proyecto. Se modelaron procesos unitarios y se construyó un flujo de impactos con porcentajes de incidencia; de esta forma, se observó qué materiales y procesos causan mayor impacto en el medio ambiente y en qué medida lo afectan.

4.3.1. Impactos ambientales por producción de materiales

En primer lugar, se obtuvieron los metrados de concreto y acero para ambas metodologías, y se calcularon las diferencias cuantitativas, entre ambas. Asimismo, se analizaron, en el *software Simapro*, los procesos unitarios para concreto y acero con valores unitarios de 1 metro cúbico y 1 kilogramo respectivamente. Dichos valores unitarios obtenidos son usados para calcular el impacto en las dos metodologías evaluadas. En las Tablas 4.16, se observan las cantidades obtenidas para ambas metodologías.

Tabla 4.16 Consolidado materiales obtenidos para ambas metodologías

	Lean	Tradicional	Variación
Concreto (m ³)	1019.00	1042.00	23.00
Acero (kg)	82941.25	89188.87	6247.35

De la Tabla 4.16, se observa que la metodología *Lean* utiliza 23 m³ de concreto premezclado menos que en el caso tradicional; mientras que en el caso del acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ *Lean* obtuvo casi 6.3 toneladas de ahorro. Esto es debido principalmente al uso de herramientas que permiten un mejor manejo de los materiales ya que el almacenaje es mínimo (hay menos daños y pérdidas de material) y al tener cuadrillas especializadas en cada actividad, la mejora continua y el aprendizaje (*Kaizen*) conllevan a un mejor uso de materiales. La Tabla 4.17, muestra los impactos ambientales en las distintas categorías de impacto, originados por el exceso de material utilizado por la filosofía tradicional de construcción, es decir, la Tabla 4.17 muestra cuánto más dañó al medio ambiente la sobreproducción de material requerido por la metodología tradicional. La Tabla fue elaborada haciendo uso del análisis de ciclo de vida de ambos materiales según las metodologías TRACI 2.1 y CED.

Tabla 4.17 Impactos ambientales por producción de material extra requerido por la filosofía tradicional.

Categoría de impacto	Unidad	Concreto	Acero	Total
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	3.48E-04	9.03E-04	1.25E-03
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	7.04E+03	1.46E+04	2.16E+04
Smog fotoquímico	kg O ₃ eq	3.45E+02	7.60E+02	1.11E+03
Acidificación	kg SO ₂ eq	1.90E+01	6.20E+01	8.10E+01
Eutrofización	kg N eq	5.00E+00	6.05E+01	6.55E+01
Cancerígenos	CTUh	4.87E-05	7.41E-03	7.46E-03
No cancerígenos	CTUh	4.21E-04	8.46E-03	8.88E-03
Partículas con efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	2.00E+00	2.03E+01	2.23E+01
Ecotoxicidad	CTUe	5.42E+03	2.41E+05	2.46E+05
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	3.56E+03	8.26E+03	1.18E+04
Consumo de energía primaria	MJ	4.12E+04	1.45E+05	1.86E+05

En adición a la Tabla 4.17, se elaboraron las Figuras 4.16 y 4.17 donde se muestran los 'pesos' de cada subproceso involucrado en la producción del concreto y acero respectivamente, con lo cual se obtiene que materiales son los más incidentes en la producción de cada uno de ellos.

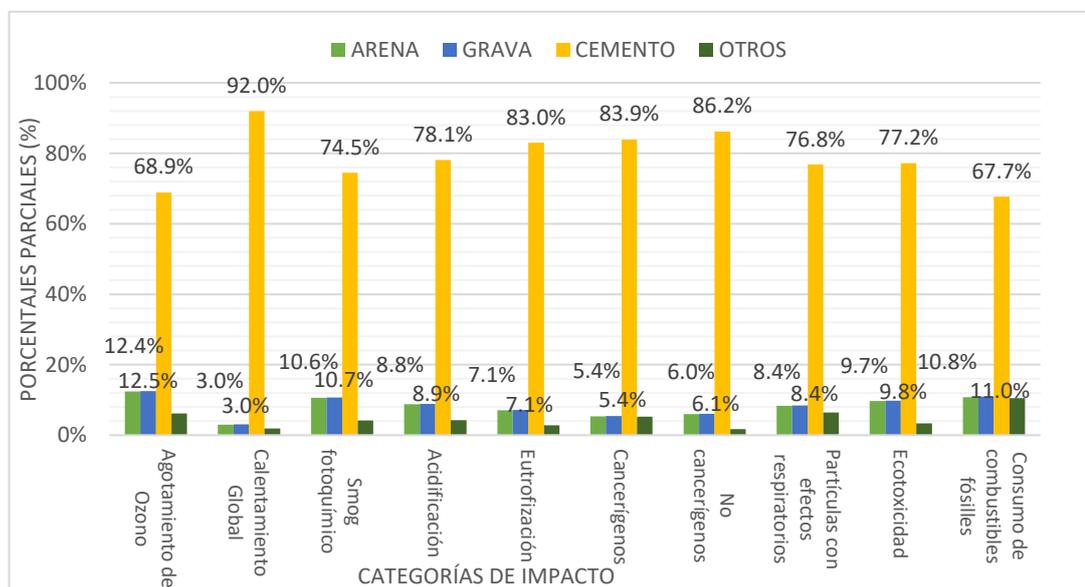


Figura 4.16 Incidencia de los principales sub procesos de concreto premezclado

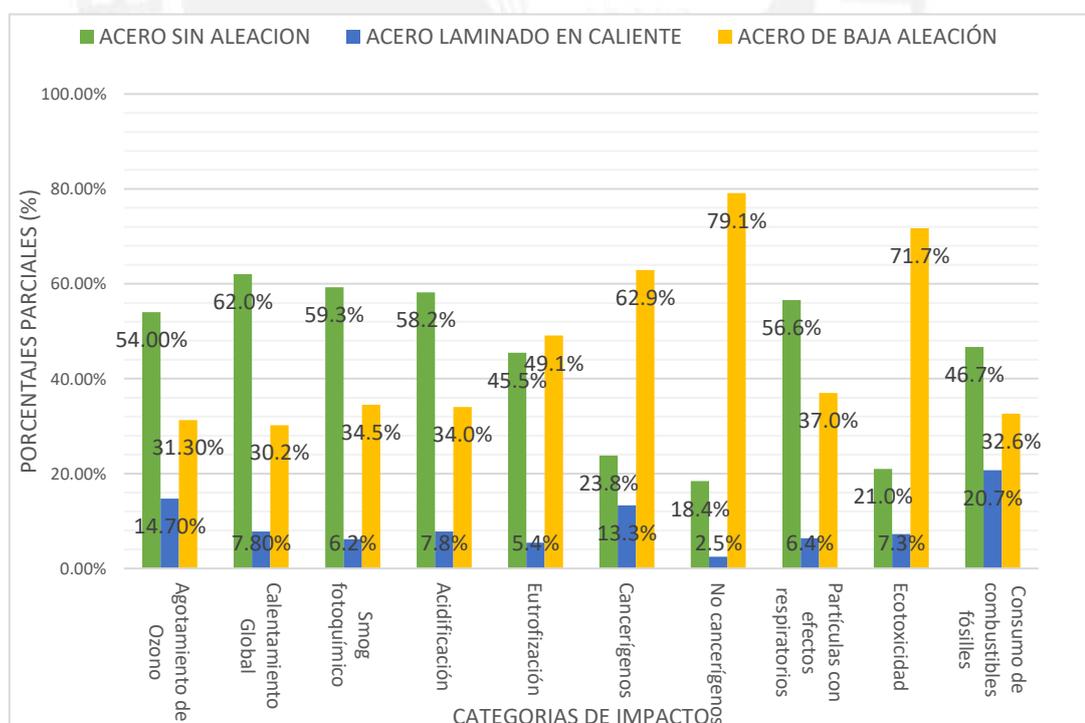


Figura 4.17 Comparativo de impactos ambientales por producción de acero

De la Figura 4.16, se observa que el subproceso con mayor generación de impactos ambientales es el de la fabricación del cemento, el cual aporta entre el 60% a 80% por cada categoría. Por otro lado, la Figura 4.17 evidencia que son 2 los procesos que tienen mayor participación en las categorías de impacto: el acero sin aleación y acero de baja aleación; mientras que el acero laminado en caliente tiene un menor peso en todas las categorías analizadas.

4.3.2. Comparativo de impactos ambientales por producción de materiales

La Figura 4.18 es una representación gráfica de la eficiencia en consumo de materiales. En ella se puede observar el comparativo del uso de recurso materiales utilizado por cada metodología. Estos son presentados en comparación con el metrado teórico del proyecto. Se observa que la metodología tradicional tiene mayor consumo de recursos materiales, mientras que, *Lean* es capaz de optimizar los recursos y mantener los porcentajes de desperdicios entre 3% y 4%.

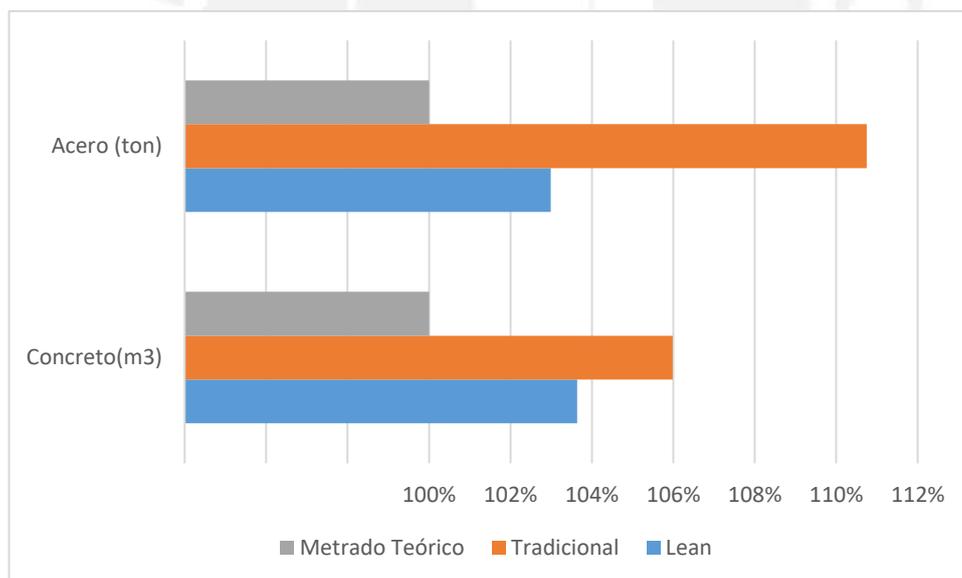


Figura 4.18 Comparativo de uso de materiales

Comparando ambas metodologías, se aprecia en la Tabla 4.16 que para el caso del concreto, la metodología tradicional hace uso de 2.26% más, mientras que para el acero de refuerzo, el uso es mayor, de 7.53% adicional. Adicionalmente, la Tabla 4.18 presenta los impactos ambientales finales ocasionados por la producción de

material utilizado en cada metodología y se aprecia que en todas las categorías de impacto, la filosofía tradicional causa mayor daño al medioambiente ya que requiere mayor material. En la última columna de la Tabla 4.18, se observa en porcentaje cuanto más afecta la construcción tradicional, promediando 5.58% en todas las categorías estudiadas según TRACI 2.1.

Tabla 4.18. Impactos ambientales de cada metodología por producción de materiales

Categoría de impacto	Unidad	Lean	Tradicional	Diferencia en %
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	2.74E-02	2.87E-02	4.56%
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	5.06E+05	5.27E+05	4.28%
Smog fotoquímico	kg O ₃ eq	2.54E+04	2.65E+04	4.35%
Acidificación	kg SO ₂ eq	1.66E+03	1.75E+03	4.87%
Eutrofización	kg N eq	1.02E+03	1.09E+03	6.39%
Cancerígenos	CTUh	1.01E-01	1.08E-01	7.42%
No cancerígenos	CTUh	1.31E-01	1.40E-01	6.78%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM _{2.5} eq	3.58E+02	3.80E+02	6.23%
Ecotoxicidad	CTUe	3.44E+06	3.69E+06	7.16%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	2.67E+05	2.79E+05	4.42%
Consumo de energía primaria	MJ	3.75E+06	3.94E+06	4.96%

4.3.3. Impactos ambientales por transporte de materiales

El cálculo de los impactos ambientales ocasionados por el transporte del concreto y acero de refuerzo fueron divididos en dos partes: envío de material desde las respectivas plantas y el regreso de los camiones a su punto de partida. Según lo explicado en el acápite 3.4.4, ambos escenarios requieren de distintas metodologías de cálculo. En el envío de material, el *input* necesario es tkm (toneladas por kilómetros), el cual se halló haciendo la sumatoria del producto de las distancias de las plantas a la obra con el peso de cada despacho para concreto y acero. En el caso de regreso de los camiones, los *inputs* son los kilómetros recorridos desde la obra hacia los centros de distribución, de manera que se multiplicó la distancia del recorrido con la cantidad de viajes realizados. La Tabla 4.19 resume los datos

obtenidos para el cálculo, donde la columna “cantidad transportada” muestra el metrado total despachado en cada caso.

Tabla 4.19. Inputs para el cálculo de impactos por transporte

	Metodología	Cantidad Transportada	# de Despachos	Kilometraje	tkm
Concreto (m3)	Lean	1019	152	2675	43043
	Tradicional	1042	142	2499	44014
Acero (kg)	Lean	82.94	23	518	1866
	Tradicional	89.19	7	158	2007

En la fila de concreto, se observa que *Lean* tiene 176 kilómetros más de recorrido; sin embargo, por la cantidad de material enviado por cada despacho, la metodología tradicional la supera por 971.52 tkm. Similarmente, para el envío de acero, *Lean* recorre 360 kilómetros más que tradicional, mientras que la esta utiliza 140.56 tkm más.

Utilizando los datos obtenidos de los envíos de materiales, se procedieron a realizar las respectivas evaluaciones de impacto ambiental para los dos materiales estudiados. Si bien es cierto, tanto para el concreto como para el acero, la metodología tradicional genera, mayor impacto en el envío de los materiales; *Lean* al necesitar significativamente más kilometraje y más envíos de material, se obtiene que esta metodología causa mayores impactos por transporte de material. Lo cual era el resultado esperado, es decir, debido a que *Lean* requiere de mayor número de despachos de materiales, los impactos generados en el transporte son mayores que en el caso tradicional. En las Tablas 4.20 y 4.21 se presentan los impactos asociados al concreto y acero respectivamente.

Tabla 4.20. Impactos por transporte del concreto

Categoría de impacto	Unidad	Lean	Tradicional	Mayor Impacto	Diferencia en %
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	5.17E-03	4.98E-03	Lean	3.65%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	2.42E+04	2.33E+04	Lean	4.06%
Smog fotoquímico	kg O3 eq	2.61E+03	2.55E+03	Lean	2.52%
Acidificación	kg SO2 eq	1.69E+02	1.62E+02	Lean	4.34%
Eutrofización	kg N eq	1.76E+01	1.69E+01	Lean	4.18%
Cancerígenos	CTUh	3.38E-04	3.20E-04	Lean	5.41%
No cancerígenos	CTUh	4.22E-03	4.08E-03	Lean	3.33%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	2.08E+01	1.99E+01	Lean	4.20%
Ecotoxicidad	CTUe	4.04E+04	4.04E+04	Lean	0.10%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	5.21E+04	5.01E+04	Lean	4.02%
Consumo de energía primaria	MJ	4.87E+05	4.66E+05	Lean	4.60%

Tabla 4.21. Impactos por transporte del acero de refuerzo

Categoría de impacto	Unidad	Lean	Tradicional	Mayor Impacto	Diferencia en %
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	1.25E-04	1.14E-04	Lean	10.14%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	4.48E+02	4.54E+02	Tradicional	1.42%
Smog fotoquímico	kg O3 eq	6.70E+01	6.96E+01	Tradicional	3.96%
Acidificación	kg SO2 eq	2.76E+00	2.76E+00	Lean	0.18%
Eutrofización	kg N eq	3.37E-01	3.22E-01	Lean	4.75%
Cancerígenos	CTUh	4.44E-06	4.05E-06	Lean	9.67%
No cancerígenos	CTUh	4.98E-05	4.59E-05	Lean	8.54%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	2.71E-01	2.56E-01	Lean	5.93%
Ecotoxicidad	CTUe	6.51E+02	5.92E+02	Lean	10.04%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	1.13E+03	1.02E+03	Lean	10.14%
Consumo de energía primaria	MJ	8.49E+03	7.71E+03	Lean	10.14%

Finalmente, la Tabla 4.22 muestra los resultados del cálculo final de transporte, donde se obtiene que *Lean* es la metodología que más afecta al medioambiente en este aspecto. Promediando todas las categorías de impacto analizadas, es 3.72%

más incidente que la metodología tradicional. Esto indica que los conceptos de JIT al aumentar los envíos de material y disminuir las cantidades enviadas tienen consecuencias negativas.

Tabla 4.22. Impactos ambientales totales por transporte de material

Categoría de impacto	Unidad	Lean	Tradicional	Mayor Impacto	Diferencia en %
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	5.29E-03	5.10E-03	Lean	3.79%
Calentamiento Global	kg CO2 eq	2.47E+04	2.37E+04	Lean	3.95%
Smog fotoquímico	kg O3 eq	2.68E+03	2.62E+03	Lean	2.35%
Acidificación	kg SO2 eq	1.72E+02	1.65E+02	Lean	4.28%
Eutrofización	kg N eq	1.80E+01	1.72E+01	Lean	4.19%
Cancerígenos	CTUh	3.42E-04	3.24E-04	Lean	5.46%
No cancerígenos	CTUh	4.27E-03	4.13E-03	Lean	3.39%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	2.11E+01	2.02E+01	Lean	4.22%
Ecotoxicidad	CTUe	4.11E+04	4.10E+04	Lean	0.24%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	5.33E+04	5.12E+04	Lean	4.14%
Consumo de energía primaria	MJ	4.96E+05	4.73E+05	Lean	4.86%

4.3.4. Evaluación de impactos ambientales totales

A continuación, se presenta el análisis final de los impactos obtenidos. Ello es una suma de los cálculos obtenidos por la producción del concreto y acero; y sus envíos. En la Tabla 4.23. se aprecia que finalmente, la metodología tradicional es la más que más impacta, por la mayor producción de material debido al manejo ineficiente de los recursos. Dicho formato de producción afecta el medio ambiente en promedio 5.03% más que la nueva metodología de construcción

Tabla 4.23. Impactos Ambientales Totales

Categoría de impacto	Unidad	Lean	Tradicional	Mayor Impacto	% de diferencia
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	3.27E-02	3.38E-02	Tradicional	3.39%
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	5.31E+05	5.51E+05	Tradicional	3.78%
Smog fotoquímico	kg O ₃ eq	2.81E+04	2.91E+04	Tradicional	3.70%
Acidificación	kg SO ₂ eq	1.83E+03	1.91E+03	Tradicional	4.53%
Eutrofización	kg N eq	1.04E+03	1.11E+03	Tradicional	6.67%
Cancerígenos	CTUh	1.01E-01	1.08E-01	Tradicional	6.89%
No cancerígenos	CTUh	1.35E-01	1.44E-01	Tradicional	6.55%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM _{2.5} eq	3.79E+02	4.00E+02	Tradicional	5.58%
Ecotoxicidad	CTUe	3.48E+06	3.73E+06	Tradicional	7.18%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	3.20E+05	3.30E+05	Tradicional	3.09%
Consumo de energía primaria	MJ	4.25E+06	4.41E+06	Tradicional	3.93%

Cabe mencionar que del análisis se encontró que el transporte aporta en promedio el 6.83% y 6.33% de los impactos finales para *Lean* y tradicional respectivamente. Asimismo, el transporte contribuye en gran medida en las categorías de agotamiento de ozono, smog fotoquímico, acidificación, consumo de combustibles fósiles y consumo de energía primaria, con una participación promedio de 15.63%, 9.26%, 9.00%, 16.06% y 11.2% del total respectivamente.

Adicionalmente, se calculó la incidencia de la producción de cemento en los impactos totales para el caso de la metodología *Lean*, los cuales se muestran en la Tabla 4.24. Esta comparación busca poner en contexto la participación actual de las emisiones de manufactura del cemento durante la etapa de pre uso de una edificación según el caso de estudio. En la Tabla se observa el gran peso que este material tiene, promediando en todas las categorías de impacto 25.58% del total.

Tabla 4.24. Incidencia de manufactura de cemento

Categoría de impacto	Unidad	Cemento Lean	Incidencia de cemento
Agotamiento de Ozono	kg CFC-11 eq	1.06E-02	32.49%
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	2.87E+05	54.04%
Smog fotoquímico	kg O ₃ eq	1.14E+04	40.52%
Acidificación	kg SO ₂ eq	6.57E+02	35.93%
Eutrofización	kg N eq	1.84E+02	17.68%
Cancerígenos	CTUh	1.81E-03	1.79%
No cancerígenos	CTUh	1.61E-02	11.91%
Partículas con efectos respiratorios	kg PM2.5 eq	6.81E+01	17.96%
Ecotoxicidad	CTUe	1.85E+05	5.33%
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	1.07E+05	33.37%
Consumo de energía primaria	MJ	1.29E+06	30.33%



Capítulo 5. Conclusiones

La presente investigación comprueba lo sostenido por algunos autores, quienes establecen de manera teórica la relación que existe entre *Lean Construction* y sostenibilidad. Se determinó que aplicando las herramientas de la filosofía *Lean* el consumo de materiales se reduce, como consecuencia de ello, se demuestra que los impactos ambientales también disminuyen.

El estudio analiza la contribución en generación de impactos ambientales de dos metodologías de producción estableciendo claras diferencias entre ambas. Gracias a la mejora continua, reducción de inventarios, planificación diaria, *lookahead*, programación de actividades por sectores, disminución de la variabilidad, control y aseguramiento de la calidad; se observa que el consumo de materiales es menor, consiguiendo una reducción de 2.3% y 7% en concreto premezclado y acero de refuerzo, respectivamente.

Por otro lado, se comprobó que *Lean* al implementar el concepto de *Just in Time* genera una mayor cantidad de envíos de material. Debido a esto, se obtuvo que en el caso del concreto premezclado, se requieran 10 envíos más de camiones de concreto y 16 camiones más de despacho de acero de refuerzo. En consecuencia, los impactos ambientales producto de traslados de vehículos de transporte de materiales son 3.72% mayor al aplicar la filosofía *Lean*.

Sin embargo, teniendo en cuenta que los impactos ambientales de la manufactura de materiales son más incidentes que aquellos producidos por el transporte de material, la suma total indica que *Lean Construction* genera menores impactos ambientales. Esto se demuestra con la reducción en 3.78% la cantidad de CO₂ equivalente emitidas al medio ambiente, 3.93% en el consumo de energía primaria, 5.58% en la emisión de PM25 equivalente y emitiendo 3.39% menos de CFC-11 equivalente.

Asimismo, se encontró que la producción del cemento es el proceso con más participación en las categorías de agotamiento de ozono, emisiones de gases de efecto invernadero, producción de smog fotoquímico, potencial de acidificación, consumo de energía primaria y consumo de combustibles fósiles. La elaboración de cemento para el caso *Lean* emite 287 toneladas de CO₂ equivalente que representa el 54% del total; además, se le atribuye aproximadamente la tercera parte de todo el consumo de energía y combustibles fósiles del proyecto, así como 11.4 toneladas de

O₃ equivalente, que representan el 40.52% del total de la generación de smog fotoquímico.

Por otro lado, se observa que la metodología tradicional de construcción emplea 7522 horas hombre más que *Lean*, lo cual equivalen a un 37% adicional. El efecto de la mayor necesidad de mano de obra impacta directamente en el plazo y en el costo del proyecto. Por consiguiente, el cronograma del proyecto según la metodología tradicional emplea 32 días más que el cronograma realizado con herramientas *Lean*, lo cual equivale a una duración 69.6% mayor. Estas variaciones se les atribuye, en primer lugar, a las herramientas del control de producción de *Lean*, como programaciones semanales o *lookaheads*. En segundo lugar, a que en el caso de *Lean*, se emplea mano de obra especializada que realiza trabajos similares y que tienen un flujo de trabajo constante, lo cual permite desarrollar una curva de aprendizaje positiva. Por ende, mejor productividad.

En nuestra opinión, el Perú tiene la oportunidad de desarrollarse creciendo de forma sostenible. Para ello, es necesario poner en práctica las experiencias positivas en países desarrollados, los estándares medioambientales y los modos de operación cuyos procesos sean sostenibles de manera probada. En el caso de la construcción de infraestructura y viviendas, se demuestra que la importancia de implementar un sistema de gestión *Lean* radica en que no solo se tiene beneficios económicos y sociales, sino que, medioambientales, también.

Es importante resaltar que, si se propone solucionar el déficit de vivienda usando un modelo de construcción siguiendo el diseño del caso de estudio u otro similar, sería necesario construir aproximadamente 84.5 millones de m² (tomando como base viviendas de 70 m² para satisfacer dicho déficit), esto sin considerar las instalaciones necesarias para proveer servicios básicos, de entretenimiento, escuelas u hospitales. Para poder construir la cantidad de viviendas necesarias, sólo en la producción de concreto y acero de refuerzo, se emitirán al aire aproximadamente 1.2E+07 toneladas de CO₂ equivalente lo cual prácticamente dobla las emisiones realizadas por procesos industriales en el año 2012, y equivale al 150% de la las mismas en la industria de manufactura y construcción en ese mismo año (MINAM - INGEI, 2012); además, demandará un total de 88.7 millones de GJ, equivalente a 8.82% del total de la energía consumida en el 2015 (Minem, 2016). Estas importantes cifras deben que ser tomadas en cuenta y servir de motivación para buscar la optimización de procesos tomando en cuenta las medidas ambientales y así contribuir a un crecimiento más sostenible.

Teniendo en cuenta lo descrito previamente, este estudio demuestra la necesidad que existe en la actualidad de implementar sistemas de gestión que integren conceptos e ideas de conservación del medioambiente. El re-uso de materiales de construcciones demolidas como agregados, producción e implementación de combustibles con límites máximos permisibles más estrictos son alternativas con las que el Estado Peruano puede mitigar los futuros impactos ambientales a producirse por el crecimiento del país y por la búsqueda de reducir el déficit actual de viviendas. Además, es importante fomentar la producción de cementos con menor huella ambiental, ya que, al ser un material con gran contribución en los impactos de un proyecto, toda mejora en el proceso de manufactura reduciría de manera importante las consecuencias en el medioambiente. En este sentido, Huntzinger y colegas (2009), encontraron que los cementos adicionales podrían reducir hasta 21% los gases de efecto invernadero, lo cual sería una buena opción a tomar en cuenta.

Como conclusión final, la filosofía *Lean Construction* contribuye a que la construcción sea un rubro más sostenible, ya que en general tiene un efecto positivo al reducir la generación de impactos ambientales y generar beneficios tanto económicos como sociales. De esta manera el estado peruano, debe fomentar, exigir y regular la implementación de este sistema de producción a todos los proyectos de gran envergadura.

Referencias

- Ahuja, R. (2012). GO LEAN AND GREEN. Amity: Amity School of Architecture and Planning.
- Ahuja, R. (2012). LEAN AND GREEN CONSTRUCTION. International Journal of Scientific & Engineering Research.
- Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercados. (2015). NIVELES SOCIOECONÓMICOS 2015. Lima.
- Bhamu, J., Singh, K. (2013). Lean manufacturing: literature. Pilani: Birla Institute of Technology and Science.
- Ballard, G., & Howell, G. (1994). Implementing lean construction: stabilizing work flow. Lean construction, 101-110.
- Ballard, G. (2000). Lean Project Delivery System (pp. 1-7, Tech.). Lean Construction Institute
- BALLARD, Glenn; Todd ZABELLE: 2000c White Paper #10 Lean Design: Process, Tools, & Techniques. Lean Construction Institute
- Bergmiller, S., McCright, P. (2009). Are Lean and Green Programs Synergistic? 2009 Industrial Engineering Research Conference. Lubbock.
- Brown, M. T., & Bardi, E. (2001). Handbook of energy evaluation. A compendium of data for energy computation issued in a series of folios: Folio #3: Energy of ecosystems. (Tech.). Gainesville, Florida: Center for Environmental Policy. Environmental Engineering Sciences, University of Florida.
- C. M. Dües, K. H. Tan, and M. Lim, Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain, J.
- Cáceres, A. L. (2016). Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en lima (Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016) (pp. 1-69). Lima: PUCP.
- Carneiro, S. B., Campos, I. B., & P., D. M. (2012). LEAN AND GREEN: A RELATIONSHIP MATRIX. International Group on Lean Construction. San Diego. Clean. Prod., vol. 40, pp. 93–100, Feb. 2013.
- Fondo Mivivienda. (2006). Dinámica del déficit habitacional en el Perú. Documento de trabajo, Lima.Fondo Mivivienda S.A. (25 de Julio de 2017). Fondo

Mivivienda. Obtenido de <http://www.mivivienda.com.pe/PortalWEB/fondo-MIVIVIENDA/pagina.aspx?idpage=3#FMV>

- Guzman, A. (2014). Aplicación de la filosofía Lean Construction en la planificación, programación, ejecución y control de proyectos (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014) (pp. 27-29). Lima: PUCP
- Hartinia, S., U. C. (2015). The relationship between lean and sustainable manufacturing on. Industrial Engineering and Service Science.
- Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. L. (1999). Natural capitalism creating the next industrial revolution. New York: Little, Brown and Company.
- Horman, M. R. (2004). Lean and Green: Integrating sustainability and lean construction. CIB World building congress. Toronto.
- Huovila, P.; Koskela, L. (1998). Contribution of the Principles of Lean Construction to Meet the Challenges of Sustainable Development. Proceedings IGLC-6
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D. (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. Journal of Cleaner Production, 17(7), 668-675.
- Instituto Metropolitano de Planificación. (2014). Proyecciones poblacionales para Lima metropolitana a los años horizonte 2018 - 2021 - 2025 y 2035 a nivel distrital. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2007). Perú: Mapa del Déficit Habitacional a Nivel Distrital. Lima.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2012). Principales Indicadores del Sector Construcción. Lima.
- Klöpffer, W. (Ed.). (2014). Background and future prospects in life cycle assessment. Springer Science & Business Media.
- KOSKELA, L. (1992). APPLICATION OF THE NEW PRODUCTION PHILOSOPHY TO CONSTRUCTION (Tech. No. 72). CIFE
- Lapinski, A. H. (2005). Delivering Sustainability: Lean principles for green projects. Proceedings of the construction research congress. San Diego, CA.

- Lenzen, M., & Treolar, G. J. (n.d.). Embodied Energy in buildings: wood, versus concrete. Reply to Borjesson and Gustavsson (Vol. 30, Energy Policy, pp. 244-249, Tech.).
- Mccormack, M., Treloar, G., Palmowski, L., & Crawford, R. (2007). Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research & Information*, 35(2), 156-162.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). Balance Nacional de Energía 2015. Lima.
- Ministerio del Ambiente. (2012). Decreto Supremo N°009-2012-MINAM. Lima.
- Ministerio del Ambiente - MINAM, INGEI. (2012). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Lima, Lima: INGEI. Resumen del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2012
- Mossman, A. (2008). What is Lean Project Delivery? (pp. 1-2, Tech.). UK: The Change Business
- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2014). Memoria PLAM 2035. Lima.
- Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2014). EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013 Update Sept 2014 1. European Environment Agency: Copenhagen, Denmark.
- Pons, J. F. (2014). Introducción a Lean Construction. Madrid: Fundación Laboral de la Construcción.
- Pre Consultants. (2016a). SimaPro 8 Introduction to LCA: [Manual]. Amsterdam, Holanda
- Pre Consultants. (2016b). SimaPro 8 Data base manual. Methods Library: [Manual]. Amsterdam, Holanda
- Quality Assurance vs Quality Control. (n.d.). Revisado 05 de Febrero, 2017, de http://www.diffen.com/difference/Quality_Assurance_vs_Quality_Control
- Ramos, J. (1991). COSTOS Y PRESUPUESTOS EN EDIFICACIÓN. Lima: CAPECO.
- Ruiz Conejo, P. L. (2015). Propuesta de técnicas y herramientas para optimizar la gestión visual y de las comunicaciones durante la etapa de diseño de un proyecto de construcción (Tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015) (pp. 10-136). Lima: PUCP.

Sacks, R., Dave, B., Koskela, L., & Owen, R. (2009). Analysis framework for the interaction between lean construction and Building Information Modelling.

Skoyles, E. R. (1982). Waste and the estimator. Chartered Inst. of Building.

Supply Management Defined. (n.d.). Revisado 05 de Febrero, 2017, de <<https://www.instituteforsupplymanagement.org/content.cfm?ItemNumber=5558&SSO=1>

Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI) (Publication). (2012, June). Revisado 09 de Febrero, 2017, de U.S. Environmental Protection Agency (EPA) website: <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf>

UNE-EN ISO 14040: gestión ambiental: análisis del ciclo de vida: principios y marco de referencia. (2006). Madrid: AENOR.

US Environmental Protection Agency (2008) Climate Change Basic Information [online]. <http://epa.gov/climatechange/basicinfo.html> Revisado 09 de Febrero, 2017.

WEIDEMA, B.P. et ál. 2013 Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database versión 3. ecoinvent version 3. Consulta: 25 de Mayo de 2017. <https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf

Willmott Dixon. (2010). The impacts of construction and the build environment., (págs. 1-6). Letch