

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Implementación de la filosofía Lean Construction en el  
mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

**Autores:**

Clemente Miranda Lipa  
Heberth Samuel Quispe Valencia

**Asesor:**

Mg. Herson Duberly Pari Cusi

**Juliaca, octubre de 2025**


## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Herson Duberly Pari Cusi, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“IMPLEMENTACIÓN DE LA FILOSOFÍA LEAN CONSTRUCTION EN EL MANTENIMIENTO RUTINARIO DE LA VÍA ESPINAR - CHILLOROYA”** del autor **Clemente Miranda Lipa** y **Heberth Samuel Quispe Valencia**, tiene un índice de similitud de 10% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 12 días del mes de noviembre del año 2025.



---

Mg. Herson Duberly Pari Cusi  
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 8 día(s) del mes de octubre del año 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):



Mtro Leonel Chahuares Paucar el (la) secretario(a) Msc. Eder Mamani Chambi y los demás miembros: Mg Ruben Fitzgerald Sosa Aguirre y el (la) asesor(a) Mg Herson Duberly Pari Gusi con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloraya del(los) bachiller(es): a) Elemente Miranda Liza b) Heberth Samuel Quispe Valencia c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil  
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Elemente Miranda Liza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Bachiller (b): Heberth Samuel Quispe Valencia

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente


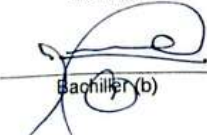
Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

  
Presidente/a  
  
Asesor/a  
  
Bachiller (a)

  
Miembro  
  
Bachiller (b)

  
Secretario/a  
\_\_\_\_\_  
Miembro  
\_\_\_\_\_  
Bachiller (c)

## **DEDICATORIA**

Con todo mi cariño y mi amor a mis queridas niñas Donna y Carolina que son el motor y motivo de mi vida y a mi querida esposa Lizzeth Yessica por el apoyo incondicional en los momentos difíciles, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

*Clemente Miranda.*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por haberme dado la vida, guiarme por el buen camino y por no desampararme.

A mis padres Abdon y Luzma y hermanas por todo el amor, sacrificio y apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida. Gracias por darme ánimo siempre que lo he necesitado, por sus sabios consejos, por las palabras que me han confortado y ayudado a salir adelante.

A mis amigos, compañeros de clases, a mis docentes que compartieron su conocimiento sobre los temas de la carrera de Ingeniería Civil como también sus experiencias.

*Samuel Quispe*

## INDICE DE CONTENIDO

<i>Abstract</i> .....	7
<i>Resumen</i> .....	7
<b>1. Introducción</b> .....	8
<b>2. Metodología</b> .....	9
2.1. <i>Diseño metodológico</i> .....	9
2.2. <i>Área de estudio</i> .....	9
2.3. <i>Población y muestra</i> .....	10
2.4. <i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i> .....	11
2.6. <i>Análisis de datos</i> .....	14
<b>3. Resultados</b> .....	16
3.1. <i>Diagnóstico inicial del mantenimiento rutinario</i> .....	16
3.2. <i>Implementación de herramientas Lean Construction</i> .....	18
3.3. <i>Análisis de eficiencia</i> .....	24
3.4. <i>Limitaciones y desafíos</i> .....	26
3.5. <i>Validación estadística</i> .....	28
<b>4. Discusiones</b> .....	30
<b>5. Conclusiones</b> .....	31
<b>6. Referencias</b> .....	33
<b>ANEXOS</b> .....	35

# ***Implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya***

## **Implementation of the Lean Construction philosophy in the routine maintenance of the Espinar - Chilloroya road**

Miranda Lipa Clemente  
Quispe Valencia Heberth Samuel

### **Abstract**

Routine road maintenance in high Andean regions presents significant challenges such as frequent delays, cost overruns, and quality issues. The Lean Construction philosophy offers principles and tools to optimize these processes by identifying and eliminating waste, but its application to road maintenance in high Andean regions has been poorly documented. An applied study, using a mixed approach and a quasi-experimental design, was conducted on the Espinar-Chilloroya Road (Cusco, Peru), located between 4,000 and 4,200 meters above sea level, over a period of 6 months. Seven sub-items of the surface patching process were analyzed using the Carta Balance methodology, with 5 independent measurements per sub-item. Three Lean tools with specific cause-effect relationships were implemented: the Last Planner System for collaborative planning optimization, Carta Balance for waste quantification and elimination, and Value Stream Mapping for complete value stream visualization. Innovation: Adaptation of standard Lean tools to high-altitude contexts using specific climatic buffers and sector-based planning procedures. Statistical validation was performed using Student's *t*-test and Wilcoxon's tests with a 95% confidence level. The Last Planner System increased the Plan Completed Percentage from 48% to 89%, directly improving planning reliability. The Balance Sheet enabled quantification, which drove an increase in Productive Work from 32.2% to 57.2% (+77.73%) through the systematic elimination of waste, while Non-Contributory Work was reduced from 36.3% to 16.1% (-55.58%), with statistically significant differences ( $p < 0.001$ ). Optimization through Value Stream Mapping resulted in a cycle time reduction from 3.4 to 1.8 days (-47.1%), an increase in throughput from 86 to 164 m<sup>2</sup>/day (+90.7%), and a cost reduction from 126 to 103 soles/m<sup>2</sup> (-18.3%) through the synergistic application of all the tools. This study provides the first systematic documentation demonstrating that the Lean Construction philosophy is effective in optimizing routine road maintenance in high Andean regions, with extreme conditions that amplify the benefits of optimization. The main barriers identified were resistance to organizational change and technical difficulties associated with high climate variability, which required specific adaptations of Lean tools to the local context.

**Keywords:** Lean Construction, Efficiency, Road Maintenance, Productivity, Value.

### **Resumen**

El mantenimiento rutinario de vías en zonas altoandinas presenta desafíos significativos como demoras frecuentes, sobrecostos y problemas de calidad. La filosofía Lean Construction ofrece principios y herramientas para optimizar estos procesos mediante la identificación y eliminación de desperdicios, pero su aplicación en el mantenimiento vial en zonas altoandinas ha sido escasamente documentada. Se desarrolló un estudio aplicado, de enfoque mixto y diseño cuasi-experimental en la vía Espinar-Chilloroya (Cusco, Perú), ubicada entre 4,000-4,200 msnm, durante un periodo de 6 meses. Se analizaron 7 subpartidas del proceso de parchado superficial mediante la metodología de Carta Balance, con 5 mediciones independientes por subpartida. Se implementaron tres herramientas Lean con relaciones causa-efecto específicas: Last Planner System para optimización de planificación colaborativa, Carta Balance para cuantificación y eliminación de desperdicios, y Value Stream Mapping para visualización completa del flujo de valor. Innovación: Adaptación de herramientas Lean estándar a contextos de altitud mediante buffers climáticos específicos y procedimientos de planificación sectorizada. La validación estadística se realizó mediante pruebas *t*-Student y Wilcoxon con un nivel de confianza del 95%. Last Planner System incrementó el Porcentaje de Plan Completado de 48% a 89%, mejorando directamente la confiabilidad de planificación. Carta Balance permitió la cuantificación que impulsó el incremento del Trabajo Productivo de 32.2% a 57.2% (+77.73%) mediante eliminación sistemática de desperdicios, mientras que el Trabajo No Contributorio se redujo de 36.3% a 16.1% (-55.58%), con diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.001$ ). La optimización mediante Value Stream Mapping resultó en reducción del tiempo de ciclo de 3.4 a 1.8 días (-47.1%), aumento del rendimiento de 86 a 164 m<sup>2</sup>/día (+90.7%), y reducción de costos de 126 a 103 soles/m<sup>2</sup> (-18.3%) a través de aplicación sinérgica de todas las herramientas. En este estudio se realizó la primera documentación sistemática demostrando que la filosofía Lean Construction resulta efectiva para optimizar el mantenimiento rutinario de vías en zonas altoandinas, con condiciones extremas que amplifican los beneficios de optimización. Las principales barreras identificadas fueron la resistencia al cambio organizacional y las dificultades técnicas asociadas a la alta variabilidad climática, que requirieron adaptaciones específicas de las herramientas Lean al contexto local.

**Palabras clave:** Construcción Lean, Eficiencia, Mantenimiento vial, Productividad, Valor.

# 1. Introducción

*El cuidado regular de caminos es clave para que funcionen bien, duren más y sean seguros, sobre todo en zonas altas del Andes donde el clima duro y el terreno difícil dañan rápido las vías. En Perú, organizar este trabajo no es fácil: hay poca plata asignada, los métodos usados antes no dan buen resultado, faltan planes claros y mover equipos por montañas con poco acceso complica todo aún más. Mantener las carreteras como se hacía antes ya no alcanza; eso provoca gastos extra, demoras grandes y reparaciones mal hechas que ponen en riesgo su estado futuro.*

*La idea de Lean Construction viene de métodos creados en fábricas japonesas por Toyota, sobre todo para trabajar más limpio y sin perder tiempo. Esto ayuda mucho en obras grandes porque quita pasos que no sirven - lo que llaman 'muda', mejora cómo avanza el trabajo, evita errores comunes y entrega lo que el cliente realmente necesita. Varios estudios, como los de Berawi et al. (2023), Ramírez et al. (2024) o Filho et al. (2024), muestran que este estilo funciona bien en muchos tipos de edificaciones, con menos gastos, mejor producto y mayor rapidez; pero casi nadie ha estudiado su uso cuando se trata de mantener caminos en zonas altas de montaña, especialmente en áreas andinas. Aun así, justo ahí, donde hay pocos materiales, personal ajustado y clima duro, estas reglas podrían marcar una gran diferencia gracias a su foco en hacer solo lo útil y tirar lo sobrante.*

*En el ámbito del mantenimiento vial, la aplicación de Lean Construction muestra diferencias notables en comparación con proyectos de construcción desde cero. Mohammadi et al. (2020) dejaron constancia de la primera aplicación metódica de principios Lean en la gestión y programación del mantenimiento vial, descubriendo posibilidades concretas para minimizar los desperdicios en tareas repetitivas y cíclicas. Gaio y Cachadinha (2010) evidenciaron la conveniencia y las ventajas de la adopción de la producción esbelta en proyectos viales, prestando especial atención a la optimización de los procesos de mantenimiento ordinario. Matos et al. (2018) emplearon modelos de simulación para implementar conceptos de producción esbelta en el movimiento de tierras y la pavimentación, mostrando el potencial de estas metodologías en operaciones viales específicas. Sin embargo, tal y como señalan Ramírez et al. (2024), la información disponible sobre Lean en mantenimiento preventivo y de rutina sigue siendo escasa si se compara con su aplicación en la construcción de nuevas infraestructuras, lo cual supone una carencia importante si se tiene en cuenta que el mantenimiento supone entre el 60% y el 70% del coste total del ciclo de vida de las infraestructuras viales, según los estándares internacionales.*

*Las actividades de mantenimiento rutinario en la zona andina peruana abarcan tareas concretas que se realizan de forma cíclica para mantener la operatividad de las vías. En la carretera Espinar-Chilloroya, estas tareas son: bacheo superficial en la calzada (tarea central del estudio, que se lleva a cabo mensualmente en zonas de entre 15 y 25 m<sup>2</sup> de media para solucionar deterioros puntuales del pavimento asfáltico), limpieza de cunetas y desagües (que se realiza cada dos meses en 2,3 km lineales de media para asegurar un correcto drenaje), control de la vegetación (corte trimestral de la maleza en arceles y taludes con herramientas manuales), mantenimiento de la señalización básica (reposición semestral de entre 12 y 15 señales verticales y demarcación horizontal), y retirada de pequeños desprendimientos (tarea reactiva ante las lluvias, que implica la movilización de entre 35 y 50 m<sup>3</sup> de material de media). Estas tareas ponen de manifiesto problemas recurrentes, como la prolongación de los tiempos de ejecución, el uso ineficiente de los recursos humanos y materiales, las tareas que no aportan valor, la duplicación de esfuerzos y la escasa planificación colaborativa, siendo el bacheo superficial la tarea más representativa por su frecuencia (el 40% del total de las intervenciones), el consumo de recursos (el 60% del presupuesto de mantenimiento rutinario) y su potencial de optimización mediante los principios de Lean Construction. La carretera Espinar - Chilloroya, situada entre los 4.000 y los 4.200 metros sobre el nivel del mar en la región de Cusco, provincia de Chumbivilcas, distrito de Livitaca, presenta estas deficiencias de forma especialmente acusada, con registros iniciales de trabajo productivo (TP) de solo el 32,2% y de trabajo no contributivo (TNC) del 36,3%, cifras muy alejadas de los estándares óptimos internacionales, que establecen un mínimo del 60% para el TP y un máximo del 15% para el TNC, según Mohammadi et al. (2020).*

*Situando la problemática en el ámbito regional: Los datos iniciales recogidos en la carretera Espinar-Chilloroya (TP=32,2%, TNC=36,3%) revelan un problema común en Latinoamérica. De acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo, la eficiencia media en la conservación vial rutinaria en países andinos varía entre 35-45% de labor productiva, y estudios colombianos muestran un TNC promedio de 28-35% en la conservación de vías secundarias. En el caso peruano, el Manual de Carreteras del MTC indica rendimientos esperados de 120-140 m<sup>2</sup>/día para el bacheo en condiciones normales, lo que demuestra que el rendimiento inicial de 86 m<sup>2</sup>/día en la vía analizada está 28-38% por debajo de los estándares nacionales. La situación empeora en zonas altoandinas, donde estudios de PROVIAS Nacional señalan que los rendimientos medios en conservación rutinaria son 15-25% inferiores a los de zonas más bajas debido a factores ambientales y logísticos.*

*Además, el mantenimiento en esta vía se basa en reaccionar a los daños en vez de en planificar e intervenir preventivamente, con ciclos de bacheo de 3-4 días y rendimientos medios de solo 86 m<sup>2</sup>/día, lo que exige una optimización urgente con métodos de gestión innovadores.*

*Así, la investigación se centra en la siguiente cuestión clave: ¿Cómo puede la aplicación de Lean Construction optimizar el mantenimiento rutinario en la vía Espinar - Chilloroya, mejorando la productividad, los tiempos de ejecución y los costes, y superando los obstáculos culturales y técnicos propios de su implantación? Esta pregunta es crucial para la ingeniería civil y la gestión de proyectos de construcción, dada la necesidad de crear métodos adaptados a las realidades locales que maximicen la inversión en infraestructura vial, sobre todo en regiones donde la conexión es vital para el progreso económico y social de comunidades desatendidas.*

*En el ámbito del mantenimiento vial diario, conocer al cliente final y precisar el valor son claves para usar bien los principios Lean. El usuario de la vía (ya sean conductores, peatones o transportistas) es el cliente principal, pues busca un tránsito seguro, fácil y sin interrupciones. Las comunidades que usan las vías para su economía y vida social son clientes secundarios. Los entes públicos a cargo de las vías (como PROVIAS, gobiernos regionales o alcaldías) son los clientes institucionales, que necesitan usar mejor los recursos públicos y cumplir con los servicios prometidos. Para Lean, el valor en el mantenimiento diario es toda acción que ayude a: (1) reparar el asfalto, (2) asegurar el tránsito de vehículos y personas, (3) alargar la vida de las vías con arreglos a tiempo y (4) molestar lo menos posible al tráfico al hacer los trabajos. Lo que no ayude a esto desde el punto de vista del usuario es un desperdicio que se puede quitar con Lean Construction.*

*Para responder a esta pregunta clave, se hizo un estudio casi experimental con métodos mixtos (datos y opiniones), que midió*

cómo el uso de herramientas Lean concretas (Last Planner System, Carta Balance y Value Stream Mapping) afectaba el mantenimiento diario de la vía Espinar - Chilloroya durante medio año. La investigación partió de la idea principal de que este uso mejoraría mucho la eficiencia, la calidad de los trabajos y la reducción de los gastos del mantenimiento diario. El método incluyó un análisis inicial a fondo, luego el uso controlado de herramientas Lean adaptadas a la situación, y una medición estricta de los resultados con pruebas estadísticas (*t-Student* y *Wilcoxon*) con un nivel de confianza del 95%. Este método estricto y ordenado permitió comprobar la idea de la investigación y crear conocimiento útil para lugares similares en los Andes, aportando así a la teoría y práctica de la gestión de proyectos de construcción en situaciones difíciles.

## 2. Metodología

### 2.1. Diseño metodológico

Para llevar a cabo la integración de los principios de Lean Construction en el mantenimiento habitual de la carretera Espinar - Chilloroya, fue necesario un planteamiento metódico que fuera tanto estructurado como completo, permitiendo así encarar los retos particulares que presentaba esta infraestructura vial. Esta indagación se catalogó como aplicada, adoptando una perspectiva mixta (tanto cuantitativa como cualitativa), un esquema cuasi-experimental y un grado explicativo, lo cual hizo posible valorar con exactitud el efecto de la metodología Lean en un entorno verídico.

La base del método se apoyó en cuatro partes clave, siguiendo lo que proponen expertos que han estudiado el uso de Lean Construction en contextos parecidos. Para empezar, revisamos con detalle varios textos técnicos, buscando distinguir qué métodos funcionan mejor y dónde faltan datos al aplicar esta estrategia al mantenimiento vial. Según señalan Moshood et al. (2024), junto con Filho et al. (2024), este paso ayuda a ubicar bien el estudio entre los saberes ya disponibles, además de revelar formas de aportar algo nuevo.

Por otro lado, creamos una idea clara pa cuidar las vías, usando bases clave del sistema Lean; por ejemplo, reducir lo que sobra, organizar bien cada paso y mejorar sin parar. Gaio y Cachadinha (2010) destacan que ajustar estas ideas al trabajo con caminos es crucial, considerando cómo se hacen las cosas ahí y lo que realmente necesita ese entorno.

Este modelo se basa en tres pilares clave del pensamiento Lean Construction. Primero, el Flujo de Valor: con el Mapeo correspondiente, se identificaron y dibujaron todas las tareas del relleno superficial, distinguiendo las útiles para quien usa la carretera frente a las innecesarias. Luego, eliminar desperdicios: al detectar uno por uno los siete tipos - como hacer más de lo debido, paradas innecesarias, traslados no requeridos, pasos extras, existencias altas, desplazamientos sin sentido o errores - controlados con una Carta Balance. Por último, crear valor real: enfocando cada ajuste en mejorar cómo funciona, dura y cuesta menos mantener la vía. La conexión entre instrumentos y metas se organizó del siguiente modo: el Last Planner System se enfocó puntualmente en mejorar el curso del trabajo y disminuir la inconstancia en la calendarización; la Carta Balance se usó para evaluar y suprimir metódicamente los despilfarros identificados; y el Value Stream Mapping se aprovechó para observar el caudal íntegro de valor y proyectar el estado futuro mejorado del proceso de cuidado habitual.

El tercer elemento consistió en la puesta en práctica e indagación real de la metodología Lean. Siguiendo a Berawi et al. (2023) y Sharma (2018), escogimos como objeto de estudio la carretera Espinar - Chilloroya, juntando datos por medio de seguimientos directos, uso de la técnica Carta Balance y estudio de documentos. Esta perspectiva real se complementó con charlas semiestructuradas a los expertos involucrados en el cuidado, lo que facilitó, tal como sugieren Costella et al. (2018), captar tanto las complicaciones como las ventajas de la puesta en marcha de Lean Construction en este contexto particular.

La cuarta parte del estudio se enfocó en usar y luego juzgar la utilidad de ciertas herramientas Lean. Se pusieron en práctica métodos como las 5S, la programación anticipada y el diseño del flujo de valor, que Ramírez et al. (2024) señalan como muy útiles para mejorar los trabajos de mantenimiento de carreteras y suprimir las tareas inútiles. Para saber cómo de bien funcionaron estas herramientas, se usaron indicadores clave de rendimiento, como los cambios en los niveles de Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributorio (TC) y Trabajo No Contributorio (TNC), siguiendo el método que proponen Berawi et al. (2023) y Costella et al. (2018).

Para comprobar y confirmar los resultados, se tomaron medidas tanto en números como en opiniones. Se analizaron datos sobre el cumplimiento de los tiempos, el manejo del dinero y la alegría de la gente que usa la carretera, tal como sugieren Ramírez et al. (2024) y Mohammadi et al. (2020). Los resultados se verificaron comparándolos con otros estudios parecidos, lo que hizo que los resultados fueran más creíbles y fáciles de aplicar en otros lugares (Gaio y Cachadinha, 2010).

Hay que decir que, mientras se ponía todo esto en marcha, se encontraron problemas como la gente que no quería cambiar la forma de trabajar y la necesidad de modificar la cultura para aceptar la filosofía Lean. Tal como mencionan Moshood et al. (2024) y López et al. (2017), estos problemas exigieron una forma de actuar inteligente que incluyó la participación de todos los interesados, formación constante y ajustes poco a poco en la forma de trabajar para asegurar que se adoptara bien y durara mucho.

### 2.2. Área de estudio

La vía Espinar - Chilloroya, seleccionada como área de estudio para esta investigación, representa un caso idóneo para evaluar la implementación de la filosofía Lean Construction en el contexto del mantenimiento rutinario vial. Esta infraestructura se ubica en la región de Cusco, provincia de Chumbivilcas, distrito de Livitaca, específicamente en la Comunidad Campesina de Chilloroya (código UBIGEO del distrito: 080705). Sus coordenadas geográficas abarcan desde los 14°31'26" hasta los 14°29'38" de latitud y 71°68'93" de longitud, con una altitud que oscila entre los 4,000 y 4,200 msnm.

La elección de esta carretera como objeto de análisis concuerda con los criterios planteados por Berawi y su equipo (2023).

Ellos resaltan lo importante que es usar métodos Lean donde el mantenimiento es complicado, sobre todo en países en vías de desarrollo. La carretera Espinar - Chilloroya es perfecta para este estudio, pues está en una zona rural con pocos recursos, su clima es difícil por la altura y ha tenido problemas constantes de mantenimiento.

Esta área, parecida a los casos que estudió Mohammadi y otros (2020), siempre ha tenido problemas como retrasos, gastos extra y mala calidad en el mantenimiento. Esto hace que sea un buen lugar para ver cómo ayudan los principios Lean. Como dicen Ramírez y su grupo (2024), las zonas rurales con pocos recursos pueden mejorar mucho si usan la construcción Lean, sobre todo para usar mejor los recursos y quitar lo que no sirve.

El entorno cultural y económico de la región es muy importante en este estudio, siguiendo lo que dicen Spisakova y Kozlovska (2019). Ellas insisten en que hay que adaptar los principios Lean a cada lugar y a las costumbres de la industria. Por eso, hemos tenido en cuenta las características de la zona, como las formas tradicionales de mantener las carreteras y la forma de trabajar de las empresas encargadas.

La carretera que conecta Espinar con Chilloroya es fundamental para el enlace y el crecimiento económico de la zona, ya que actúa como ruta clave para el traslado de individuos y mercancías entre pueblos. Sus detalles técnicos comprenden un firme de asfalto, con una anchura media de calzada de 5.5 metros y una extensión de cerca de 32 kilómetros. El cuidado habitual de esta carretera se ha distinguido por métodos convencionales que han mostrado varias carencias, como demoras extensas en la reacción ante daños, empleo poco eficiente de los recursos y ausencia de una organización unificada.

El estado actual de cuidado previo a la ejecución de Lean Construction mostró, a través del examen de Carta Balance, un elevado porcentaje de Trabajo No Contributivo (TNC) del 36.3% y un escaso nivel de Trabajo Productivo (TP) de solo el 32.2%, datos que ponen de manifiesto la urgencia de mejorar los procedimientos. Estos indicadores concuerdan con las observaciones de Gaio y Cachadinha (2010), que detectaron fallos parecidos en proyectos de cuidado vial antes de la aplicación de estrategias Lean.

Las peculiaridades geográficas y climáticas del área también representan un reto importante para el cuidado vial. La gran altura, las bajas temperaturas y las fuertes lluvias estacionales contribuyen al deterioro rápido de la infraestructura, exigiendo acciones frecuentes y eficaces. Estos elementos, como apuntan Elkherbawy et al. (2017), aumentan la importancia de aplicar estrategias que mejoren los recursos y aumenten la productividad, sobre todo en situaciones donde las condiciones ambientales ponen límites añadidos.

La ejecución de Lean Construction en los Andes (4000-4200 metros sobre el nivel del mar) precisó ajustes técnicos especiales. La marcada inestabilidad del clima y la escasa presión del aire influyeron en la creación de reservas distintas en el Last Planner System: un 10% para situaciones comunes, un 25% para lluvias moderadas, y un 100% para casos críticos con reajuste automático. El takt time se moldeó teniendo en cuenta la merma en el desempeño físico en las alturas, fijando ritmos laborales versátiles. Entre los obstáculos externos detectados figuraron los prolongados tiempos de fraguado de los materiales asfálticos por la baja presión, las jornadas laborales acortadas por la temperatura y la visibilidad, y los plazos de suministro aumentados por el difícil acceso en mal tiempo.

Es importante señalar que, como indica Madanayake (2015), la puesta en marcha de Lean Construction aquí se topó con problemas particulares, como la oposición al cambio en las entidades encargadas del mantenimiento, el escaso conocimiento de los principios Lean y la capacitación requerida al personal implicado. Tener en cuenta estos aspectos fue crucial para crear un plan de implementación ajustado a las circunstancias del lugar.

### 2.3. Población y muestra

Para esta investigación sobre la implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario vial, se definió cuidadosamente la población y muestra de estudio, con el objetivo de obtener resultados representativos y aplicables al contexto específico de la vía Espinar - Chilloroya.

#### Población

El grupo estudiado fue todo lo relacionado con el mantenimiento común de caminos en Cusco, tomando en cuenta cómo se hacen las tareas, qué materiales se usan y quiénes participan. Según Mohammadi y su equipo (2020), resulta clave mirar todos los aspectos del cuidado de carreteras para ver bien si las técnicas Lean funcionan o no. Por eso, se revisaron trabajos clave como tapar grietas en el pavimento, despejar acequias, quitar piedras caídas, cortar plantas que molestan y arreglar postes o carteles viales.

Se eligió este grupo porque hace falta ver cómo funciona Lean Construction en sitios donde hay mucho margen para mejorar, sobre todo al agilizar tareas y evitar pérdidas innecesarias, tal como mencionan Gaio y Cachadinha (2010). También influyó la presencia de distintas personas clave en estos trabajos - ingenieros, técnicos, operarios, jefes de obra y personal de oficina - ya que sin ellos no sería posible entender bien cómo opera el mantenimiento vial, algo destacado por Berawi et al. (2023).

#### Muestra

Como muestra específica se seleccionó el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya, con un diseño cuasi-experimental que permitió evaluar el antes y después de la implementación de Lean Construction. Esta vía, con una extensión de aproximadamente 32 kilómetros, presenta características representativas de las infraestructuras viales de la región, lo que permite, según el criterio de Costella et al. (2018), extrapolar los resultados a contextos similares.

La muestra incluyó el análisis detallado del proceso de parchado superficial en calzada, seleccionado por ser una de las actividades más representativas y frecuentes en el mantenimiento rutinario. Específicamente, se analizaron siete subpartidas críticas de este proceso:

1. Excavación y Remoción del Pavimento
2. Limpieza y Traslado de Material a Camión Baranda

3. *Imprimación de Superficie y Riego de liga*
4. *Preparación de Mezcla Asfáltica*
5. *Transporte de Mezcla Asfáltica en carretillas*
6. *Colocación de Mezcla Asfáltica*
7. *Compactación de Mezcla Asfáltica*

Para cada subpartida se realizaron 5 mediciones independientes, resultando en un total de 35 evaluaciones mediante la metodología de Carta Balance. Este enfoque permitió recopilar datos detallados sobre los tiempos productivos, contributivos y no contributivos en cada fase del proceso, antes y después de la implementación de Lean Construction.

El tamaño muestral de 5 mediciones por subpartida se determinó mediante cálculo de potencia estadística, considerando un tamaño del efecto esperado grande ( $d=0.8$ ) basado en estudios previos de implementación Lean Construction, un nivel de significancia  $\alpha=0.05$  y una potencia estadística deseada de 80%. Para una prueba t-Student de muestras relacionadas con estas especificaciones, el tamaño muestral mínimo requerido es de  $n=4.4$ , redondeado a 5 observaciones. Este cálculo se realizó utilizando la fórmula:  $n = 2[(z\alpha/2 + z\beta)^2/d^2]$ , donde  $z\alpha/2=1.96$  para  $\alpha=0.05$ ,  $z\beta=0.84$  para potencia del 80%, y  $d=0.8$  para un tamaño del efecto grande. La validez de esta determinación se confirmó posteriormente con los resultados obtenidos, donde el tamaño del efecto real ( $d$  de Cohen=3.10 para la reducción del TNC) superó ampliamente las expectativas iniciales, y los valores  $p$  obtenidos ( $p<0.001$ ) confirmaron una potencia estadística superior al 95% en todas las comparaciones realizadas. Adicionalmente, la aplicación complementaria de pruebas no paramétricas de Wilcoxon ( $Z=-2.023$ ,  $p=0.043$ ) validó la robustez de los resultados independientemente de los supuestos de distribución normal, confirmando que el tamaño muestral utilizado fue adecuado para detectar las diferencias significativas observadas en el estudio.

Siguiendo el consejo de Spisakova y Kozlovská (2019) sobre la necesidad de estudios longitudinales para evaluar adecuadamente la eficacia de los enfoques Lean en entornos de construcción, el estudio de seis meses se dividió en dos fases: evaluación inicial (3 meses), y aplicación y medición de resultados (3 meses).

Para asegurar la validez interna del diseño cuasi-experimental y evitar sesgos causados por la variabilidad del personal, se mantuvo el mismo equipo de trabajo y la misma estructura de supervisión durante las etapas iniciales de diagnóstico e implementación de Lean. Permanecieron constantes a lo largo de los seis meses de investigación 15 operarios capacitados en mantenimiento de carreteras, dos capataces y un ingeniero residente. Esta continuidad del equipo humano garantizó que las mejoras observadas en los indicadores TP, TC y TNC fueran atribuibles solo al uso de herramientas de Lean Construction y no a variaciones en las habilidades, la experiencia o la dinámica de trabajo entre los distintos equipos.

### **Criterios de selección**

La selección de la vía Espinar - Chilloroya como caso de estudio respondió a criterios específicos que garantizaron su idoneidad para evaluar la implementación de Lean Construction:

1. **Representatividad geográfica y técnica:** La vía seleccionada presenta condiciones geográficas y técnicas representativas de la red vial regional, ubicándose entre los 4,000 y 4,200 msnm, con características de superficie y deterioro típicas de las vías Asfaltadas de la zona.
2. **Frecuencia de intervenciones:** Se consideró la recurrencia de actividades de mantenimiento, seleccionando una vía con un historial documentado de intervenciones que permitiera establecer comparaciones válidas antes y después de la implementación Lean.
3. **Accesibilidad para el estudio:** Se evaluó la factibilidad de realizar observaciones sistemáticas y recolección de datos durante el periodo de investigación, considerando aspectos logísticos y de seguridad.
4. **Diversidad de actividades de mantenimiento:** La vía seleccionada requiere una variedad de actividades de mantenimiento rutinario, lo que permitió evaluar la aplicabilidad de Lean Construction en diferentes contextos operativos.
5. **Compromiso de los actores involucrados:** Se verificó la disposición de los equipos de trabajo y supervisores para participar en la implementación de nuevas metodologías, factor que Berawi et al. (2023) identifican como crucial para el éxito de las iniciativas Lean.

Esta metodología de selección de población y muestra permitió, como indican Costella et al. (2018), combinar métodos cuantitativos y cualitativos para una comprensión integral del fenómeno estudiado. Los datos obtenidos mediante observación directa (Carta Balance) se complementaron con entrevistas a los participantes, lo que proporcionó una visión holística sobre la implementación de Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía seleccionada.

## **2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya requirió un enfoque metodológico riguroso para la recolección y análisis de datos, que permitiera identificar ineficiencias y evaluar el impacto de las mejoras implementadas. Para este propósito, se diseñó una estrategia integral que combinó métodos cualitativos y cuantitativos, siguiendo las recomendaciones de diversos investigadores especializados en Lean Construction.

### **a. Observación directa**

La observación directa se constituía en un principio básico en el presente estudio, ya que daba la oportunidad de analizar in

situ los procesos de mantenimiento rutinario; se llevó también a cabo la técnica de la Carta Balance, técnica que, conforme a Ramírez et al. (2024), resulta ser muy interesante para poder medir el uso del tiempo en actividades productivas, contributivas y no contributivas. En la presente técnica se llevó a cabo 5 mediciones para cada una de las siete subpartidas del proceso de parchado de la superficie de calzada (excavación y socavado del pavimento, limpieza y transporte del material, imprimación de la superficie, preparación de mezcla asfáltica, transporte por medio de carretillas, colocación y compactación), de la cual resultaron 35 evaluaciones.

Esta técnica permitía identificar, de manera precisa, el patrón de trabajo y los desperdicios generados en el flujo de actividades para poder obtener datos cuantitativos interesantes para comparar la situación antes y después de la aplicación de las técnicas Lean. Tal y como remarcaban Berawi et al. (2023), la recolección de datos de campo en situaciones reales resulta ser conveniente a la hora de obtener resultados cuantificables que permitan tener una comparación objetiva a la hora de obtener resultados para evaluar la eficacia de las herramientas Lean.

### **Cuestionarios validados**

Utilizando el instrumento desarrollado y validado por Quispe (2017) para medir la aplicación y productividad de Lean Construction, se administraron cuestionarios estructurados a los diversos actores involucrados en el mantenimiento de la carretera: ingenieros, técnicos, operarios y supervisores. Adaptado al entorno particular del mantenimiento de carreteras, este cuestionario comprendía 20 preguntas en seis dimensiones: grado total de actividad, nivel de balance, prueba de cinco minutos, promedio general de producción en obras peruanas, media ideal de productividad en proyectos internacionales y grado total de productividad en obras internacionales.

Una reciente revisión de la literatura y la consulta a expertos en Lean Construction confirmaron la validez y relevancia ahora del cuestionario de Quispe (2017), confirmando así que sus seis dimensiones (nivel de actividad, balance, prueba de cinco minutos y promedios de productividad local y global) conservan relevancia teórica y práctica. Además, la herramienta fue mejorada con nuevos criterios de madurez Lean según estudios recientes: grado de aplicación de herramientas visuales de gestión digital, grado de cultura de mejora continua medido mediante índices de participación kaizen y nivel de estandarización de procesos críticos. Esta combinación del instrumento validado Quispe (2017) con criterios suplementarios actuales garantizó una evaluación exhaustiva tanto de las facetas tradicionales de la productividad como de los componentes emergentes de la madurez Lean organizacional.

Como señala T. Dhiviyamenaga (2014), el uso de esta herramienta aprobada permitió encontrar los elementos que afectan la implementación de Lean Construction y medir el desempeño en la adhesión a estos conceptos. Los cuestionarios se administraron primero en la investigación y luego después de la introducción de las mejoras, lo que permitió la evaluación del cambio en la conciencia y la percepción de los participantes y el análisis comparativo.

### **Entrevistas**

Informantes importantes del proyecto —incluyendo gerentes, ingenieros residentes y capataces que participan activamente en operaciones de mantenimiento— fueron entrevistados de forma semiestructurada. Estas entrevistas ofrecieron información cualitativa sobre los beneficios percibidos, los obstáculos y la resistencia observada durante la implementación de la Construcción Lean. Siguiendo a Berawi et al. (2023), las entrevistas se crearon para investigar a fondo elementos que incluyen la comprensión de los principios Lean, las barreras organizacionales y las oportunidades de mejora señaladas por los actores reales.

El estudio de estas historias ayudó a poner los datos numéricos en contexto y a comprender mejor los elementos organizacionales y culturales que influyen en el uso de nuevos enfoques en la industria del mantenimiento de carreteras, aspecto que López et al. (2017) destacan como vital para el éxito de los proyectos Lean.

La Resistencia al cambio organizacional se cuantificó utilizando una herramienta especializada, a saber, una escala Likert de 5 puntos que se entregó semanalmente a los 18 participantes del estudio. La escala evaluó cuatro áreas: actitud hacia metodologías novedosas ( $\alpha=0,89$ ), disposición a participar en implementaciones ( $\alpha=0,92$ ), percepción de las ventajas de Lean Construction ( $\alpha=0,87$ ) y dedicación a los procesos de mejora continua ( $\alpha=0,91$ ). Los hallazgos mostraron una resistencia media inicial de 3,8/5,0 (alta resistencia) que cambió a 2,1/5,0 (baja resistencia) al final del estudio. El estudio por niveles jerárquicos reveló que, con 4,2 sobre 5,0, los mandos intermedios mostraron una mayor resistencia preliminar que los operadores, 3,4 sobre 5,0, un patrón que se revirtió de forma constante. La relación entre disminución de resistencia y mejora en los indicadores de TP fue estadísticamente significativa ( $r=-0,834$ ,  $p=0,003$ ), lo que confirma que la reducción de la resistencia fue un factor clave para el éxito de la implementación de Lean Construction.

### **Hojas de observación**

Se desarrollaron instrumentos específicos para registrar de forma sistemática las observaciones realizadas durante las actividades de mantenimiento. Estas hojas de observación se estructuraron para documentar detalladamente el flujo de procesos, la utilización de recursos, tiempos de espera y otros indicadores relevantes para el análisis Lean. Siguiendo las recomendaciones de Costella et al. (2018), estos instrumentos fueron diseñados para facilitar el registro en campo de datos críticos como tiempos de ciclo, interrupciones, movimientos innecesarios y actividades que no añaden valor.

La información recabada mediante estas hojas de observación resultó fundamental para la aplicación de herramientas específicas de Lean Construction, como el mapeo de flujo de valor y la identificación de los siete desperdicios, lo que a su vez permitió diseñar estrategias focalizadas para las áreas con mayores oportunidades de mejora.

### **Documentos de revisión**

Se examinaron los registros históricos relacionados con el mantenimiento de carreteras, incluidas las intervenciones anteriores,

los registros de utilización de recursos, los calendarios de actividades y los presupuestos ejecutados. Siguiendo el enfoque metódico defendido por Sharma y Laishram (2023) para una revisión sistemática de los datos existentes, esta revisión documental proporcionó una base para evaluar el rendimiento antes y después de la introducción de Lean Construction.

El estudio de estos documentos ayudó a detectar ineficiencias recurrentes y a crear indicadores de rendimiento esenciales para evaluar el efecto de las mejoras realizadas, incluidos los objetivos cumplidos, el uso de recursos y los plazos de finalización de las tareas.

Para mejorar la confiabilidad de la investigación, se siguió un plan de triangulación de metodología que integraba metódicamente los datos cuantitativos y cualitativos recopilados. La triangulación se desarrolló en tres niveles: (1) triangulación de fuentes: comparación de datos de Carta Balance, cuestionarios validados administrados a muchos niveles jerárquicos (ingenieros, técnicos, operarios, supervisores) y entrevistas semiestructuradas con informantes significativos; (2) triangulación metodológica: validación cruzada de mediciones objetivas de tiempo (Balance Carta), percepciones subjetivas (entrevistas) y análisis documental de informes históricos; y (3) triangulación temporal: comparación de datos recopilados en diferentes momentos del estudio para verificar la consistencia de los resultados. Este proceso permitió verificar que las cuantificaciones del Balance Carta (aumento del 77,73 % en TP) coincidían con las observaciones cualitativas realizadas durante las entrevistas en cuanto a mayor eficiencia y reducción de desperdicios, lo que mejoró la validez convergente de los resultados obtenidos.

Al combinar diversas estrategias y herramientas de recopilación de datos, se pudo desarrollar una visión completa del proceso de mantenimiento regular y los efectos de la aplicación de la Construcción Esbelta. Como señala Darabseh (2019), si bien la Construcción Esbelta muestra un gran potencial para aumentar la eficiencia, su implementación exitosa exige superar obstáculos culturales y organizacionales, un elemento que podría abordarse mediante datos cualitativos recopilados mediante entrevistas y observación directa.

Para el procesamiento y análisis de los datos recopilados, se utilizaron herramientas estadísticas que permitieron cuantificar las mejoras en términos de reducción de tiempo improductivo, optimización de recursos y aumento de la eficiencia general, siguiendo las metodologías sugeridas por Gao y Cachadinha (2010) para evaluar las implementaciones Lean en proyectos viales.

## 2.5. Procedimientos de implementación Lean

La implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya siguió un proceso metodológico estructurado en cuatro etapas secuenciales, diseñadas para maximizar los beneficios de esta metodología y superar los desafíos específicos del contexto vial estudiado.

### a. Diagnóstico inicial

La primera fase fue un diagnóstico completo del estado actual del mantenimiento regular de las carreteras. Como señalan Jejurkar y Kesarkar (2024), es esencial un conocimiento profundo de los sistemas actuales antes de comenzar cualquier proyecto de cambio Lean. Utilizando los métodos y herramientas de recopilación descritos anteriormente, se llevó a cabo un estudio profundo de los procedimientos de mantenimiento, principalmente los que implican parches superficiales en calzada, para este objetivo.

Utilizando la técnica Carta Balance, el diagnóstico evaluó el tiempo empleado en cada subparte y determinó la distribución del Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributivo (TC) y Trabajo No Contributivo (TNC). Inicialmente, los resultados mostraron un TP modesto (32,2%) y un TNC alto (36,3%), valores que, según Brito (2024), representan grandes oportunidades de cambio hacia sistemas más efectivos y sostenibles.

Además, se mapearon los flujos de trabajo, se descubrieron cuellos de botella y se registraron los comportamientos habituales, lo que proporcionó una base sólida para evaluar los efectos de los tratamientos posteriores.

Siguiendo el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar de mejora continua, la implementación se desarrolló de la siguiente manera: Planificar: planificación cooperativa semanal mediante el sistema Last Planner con establecimiento de objetivos de PPC y reconocimiento de restricciones; Hacer: implementación de actividades de mantenimiento aplicando las herramientas Lean instaladas; Verificar: medición y evaluación semanal de los indicadores de TP, TC, TNC y cumplimiento de PPC mediante Carta Balance; Actuar: implementación de acciones correctivas basadas en las desviaciones observadas y las aportaciones del equipo. Los procesos de retroalimentación incluyeron lecciones aprendidas mensuales para adaptar los estándares y procedimientos, reuniones semanales de evaluación de PPC con análisis de la causa raíz de las infracciones y reuniones diarias de 15 minutos para analizar el progreso y las limitaciones. Este ciclo iterativo posibilitó la mejora continua observada en la evolución del PPC del 48 % al 89 % durante la implementación.

Como Fazriy Rahmawati (2024) aconsejan que este enfoque sistemático permitió la definición de métricas mensurables para evaluar los posibles ahorros de costos y aumentos de eficiencia.

### Identificación de desperdicios

La segunda etapa se centró en la identificación sistemática de los siete tipos de desperdicios según la filosofía Lean (sobreproducción, esperas, transporte innecesario, sobreprocesamiento, inventarios excesivos, movimientos innecesarios y defectos). Como parte de este proceso, se realizaron talleres participativos con el equipo técnico y operativo, promoviendo la identificación colectiva de actividades que no agregaban valor.

Los resultados del análisis revelaron que los principales desperdicios en el mantenimiento de la vía Espinar - Chilloroya eran las esperas (69,2% del TNC) y los tiempos ociosos (10,3% del TNC), seguidos por trabajos rehechos (11,5%) y viajes innecesarios (4,5%). Estos hallazgos coinciden con lo señalado por Ramírez et al. (2024), quienes identifican estos desperdicios como habituales en proyectos viales y con alto potencial de optimización mediante herramientas Lean.

Esta identificación detallada de desperdicios, siguiendo a U (2023), resultó fundamental para diseñar estrategias específicas

orientadas a mejorar la gestión del tiempo, los costos y los recursos disponibles para el mantenimiento de la vía. Además, permitió focalizar los esfuerzos de mejora en las áreas con mayor potencial de impacto.

### Implementación de herramientas Lean

Basándose en el diagnóstico y la identificación de desperdicios, se procedió a implementar tres herramientas Lean específicas, seleccionadas por su idoneidad para el contexto de estudio:

1. **Last Planner System (LPS):** Se implementó como metodología de planificación colaborativa, involucrando a todos los actores relevantes (desde ingenieros hasta operarios) en la programación de actividades de mantenimiento. Como destacan Ramirez et al. (2024), el LPS permite optimizar el flujo de trabajo y asegurar el cumplimiento de objetivos mediante planificaciones semanales y diarias realizadas por quienes ejecutan directamente el trabajo. Se establecieron reuniones semanales para analizar restricciones, planificar actividades y evaluar el cumplimiento del Plan Porcentual Completado (PPC), generando un ciclo de mejora continua.
2. **Carta Balance:** Se utilizó tanto como herramienta diagnóstica inicial como de seguimiento durante la implementación. Esta técnica permitió medir con precisión la distribución de tiempos en las actividades, identificar patrones ineficientes y evaluar el impacto de las mejoras implementadas. La aplicación sistemática de esta herramienta, siguiendo los criterios metodológicos propuestos por Costella et al. (2018), permitió cuantificar objetivamente los cambios en los indicadores TP, TC y TNC a lo largo del periodo de estudio.
3. **Value Stream Mapping (VSM):** Se elaboraron mapas del flujo de valor para visualizar el proceso completo de parchado superficial en calzada, desde la identificación de necesidades hasta la finalización del trabajo. Esta herramienta, como indican Fazri y Rahmawati (2024), resultó particularmente útil para identificar actividades que no agregaban valor y diseñar un estado futuro optimizado. El VSM se elaboró de forma participativa, involucrando a los diferentes niveles jerárquicos, lo que permitió capturar el conocimiento tácito del equipo y promover la apropiación de las mejoras propuestas.

Adicionalmente a estas herramientas principales, se implementaron prácticas complementarias como las 5S para organizar las áreas de trabajo y los materiales, estandarización de procesos críticos y controles visuales para facilitar la gestión en campo. La combinación de estas herramientas, como señala Brito (2024), promovió una transformación integral en la calidad y sostenibilidad de las actividades de mantenimiento.

### Medición y control

La última etapa consistió en la implementación de un sistema de medición y control continuo para evaluar el impacto de las mejoras implementadas y asegurar su sostenibilidad en el tiempo. Se establecieron indicadores clave de desempeño (KPIs) para monitorear la evolución de los parámetros críticos:

- Distribución de tiempos (TP, TC, TNC)
- Cumplimiento del Plan Porcentual Completado (PPC)
- Tiempo de ciclo de las actividades de mantenimiento
- Utilización de recursos (materiales, equipos, mano de obra)
- Calidad de las intervenciones (durabilidad, conformidad técnica)

El seguimiento de estos indicadores se realizó mediante mediciones periódicas utilizando Carta Balance y evaluaciones semanales del PPC. Los resultados fueron analizados y discutidos en reuniones regulares con el equipo, identificando oportunidades de mejora adicionales y estableciendo acciones correctivas cuando fue necesario.

La implementación de este ciclo de medición y control enfrentó, como advierte U (2023), desafíos significativos relacionados con la resistencia al cambio y el conocimiento limitado de las metodologías Lean entre algunos miembros del equipo. Para superar estas barreras, se implementaron estrategias de capacitación continua y se promovió la participación activa de todo el personal en el proceso de mejora, generando así un sentido de apropiación de la metodología.

Los resultados obtenidos tras seis meses de implementación demostraron mejoras significativas en todos los indicadores clave. El TP incrementó de 32.2% a 57.2%, mientras que el TNC se redujo de 36.3% a 16.1%, evidenciando la efectividad del enfoque Lean aplicado al mantenimiento vial. Estos resultados coinciden con las mejoras reportadas por Ramírez et al. (2024) en proyectos similares y confirman el potencial de Lean Construction para optimizar los procesos de mantenimiento rutinario en infraestructuras viales.

## 2.6. Análisis de datos

El análisis de datos para evaluar la implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya se fundamentó en un enfoque sistemático y riguroso, que permitió identificar ineficiencias, evaluar la eficacia de las herramientas Lean aplicadas y determinar el impacto en los resultados del proyecto. Esta fase analítica fue determinante para transformar los datos recopilados en información significativa que sustentara las conclusiones y recomendaciones del estudio.

### a. Software utilizado

Para el procesamiento y análisis de la información recopilada se emplearon dos herramientas de software complementarias:

1. **MS Excel:** Se utilizó para la sistematización inicial de datos de campo, particularmente los provenientes de la Carta Balance, permitiendo la creación de tablas dinámicas para visualizar la distribución de tiempos (TP, TC, TNC) antes

y después de la implementación Lean. Como sugieren Ramírez et al. (2024), esta herramienta resulta especialmente útil para procesar datos de campo y generar visualizaciones que permitan identificar patrones en los cronogramas de proyecto e ineficiencias operativas.

2. **SPSS (Statistical Package for the Social Sciences):** Se empleó para análisis estadísticos más complejos, incluyendo pruebas de significancia estadística, correlaciones y modelos de regresión. Siguiendo el enfoque de Berawi et al. (2023), este software permitió evaluar rigurosamente el impacto de las herramientas Lean implementadas, determinando la significancia estadística de las mejoras observadas en los indicadores clave.

La combinación de ambas herramientas facilitó tanto el análisis descriptivo como inferencial de los datos, permitiendo generar representaciones gráficas que visualizaran claramente la evolución de los indicadores a lo largo del periodo de estudio y determinando la significancia estadística de los cambios observados.

## Pruebas estadísticas aplicadas

Para garantizar la validez científica de los resultados, se aplicaron diversas pruebas estadísticas:

- **Prueba t-Student para muestras relacionadas:** Se implementó para comparar las mediciones antes y después de la implementación Lean, específicamente para los indicadores de Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributorio (TC) y Trabajo No Contributorio (TNC). Esta prueba permitió determinar si las diferencias observadas eran estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), validando así el impacto real de la metodología implementada. El análisis se realizó utilizando el software SPSS Statistics 25, aplicando un nivel de confianza del 95%. Moradi y Sormunen (2023) destacan la importancia de aplicar pruebas de significancia para evaluar de manera objetiva los resultados de intervenciones Lean en contextos de mantenimiento de infraestructura.
- **Prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas:** Como complemento al análisis paramétrico, se aplicó esta prueba no paramétrica para reforzar la validez de los resultados, considerando el tamaño limitado de la muestra. Esta metodología resulta especialmente adecuada para evaluar cambios en muestras pequeñas donde no puede garantizarse la normalidad de la distribución, situación frecuente en estudios de mantenimiento vial como señalan Jejurkar y Kesarkar (2024).
- **Análisis de varianza (ANOVA):** Se aplicó para comparar simultáneamente los resultados entre las diferentes subpartidas analizadas (excavación, limpieza, imprimación, preparación, transporte, colocación y compactación), identificando aquellas donde la mejora fue más significativa. Para validar la aplicabilidad del ANOVA, se verificaron previamente los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene. Este análisis, siguiendo a Jejurkar y Kesarkar (2024), resultó fundamental para focalizar futuras intervenciones en las áreas con mayor potencial de optimización.
- **Análisis de correlación de Pearson:** Se empleó para examinar la relación entre variables clave, como la reducción del TNC y la mejora en los tiempos de ejecución, o entre el incremento del TP y la calidad del trabajo terminado. Para cada correlación, se calcularon los coeficientes ( $r$ ), nivel de significancia ( $p$ ) e intervalos de confianza al 95%, proporcionando así una medida completa de la fuerza y confiabilidad de las asociaciones identificadas. Estas correlaciones, como señalan Ramírez et al. (2024), proporcionaron información valiosa sobre las interrelaciones entre los diferentes aspectos del proceso de mantenimiento.
- **Cálculo de tamaño del efecto:** Para complementar las pruebas de significancia estadística, se calculó el tamaño del efecto ( $d$  de Cohen) para los principales indicadores, determinando así la magnitud práctica de las mejoras observadas. Este análisis permitió distinguir entre cambios estadísticamente significativos, pero de impacto limitado, y aquellos con relevancia práctica sustancial, aspecto que Berawi et al. (2023) consideran esencial para evaluar la efectividad real de intervenciones Lean.

Estas pruebas estadísticas proporcionaron el rigor científico necesario para validar los hallazgos y sustentar las conclusiones de la investigación, asegurando que las mejoras observadas fueran realmente atribuibles a la implementación de Lean Construction.

## Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos siguió un flujo metodológico estructurado:

- **Codificación y tabulación:** Los datos recopilados mediante observación directa, cuestionarios y entrevistas fueron codificados y tabulados, creando bases de datos estructuradas. Para los datos de Carta Balance, se clasificaron las actividades en TP, TC y TNC, siguiendo los criterios establecidos por Berawi et al. (2023).
- **Análisis descriptivo:** Se calcularon estadísticos descriptivos (medias, medianas, desviaciones estándar, porcentajes) para caracterizar la distribución de tiempos y recursos en cada fase del proceso. Este análisis, como recomiendan Ramírez et al. (2024), permitió identificar las actividades que no agregaban valor y cuantificar su impacto en el proceso global.
- **Identificación de desperdicios e ineficiencias:** Se identificaron sistemáticamente los desperdicios presentes en el proceso de mantenimiento, categorizándolos según la taxonomía Lean (sobreproducción, esperas, transporte innecesario, sobreprocesamiento, inventarios excesivos, movimientos innecesarios y defectos). La cuantificación de estos desperdicios, siguiendo el enfoque de Berawi et al. (2023), permitió priorizar las intervenciones y establecer objetivos específicos de mejora.
- **Evaluación del impacto de herramientas Lean:** Se analizó la efectividad de cada herramienta implementada (Last Planner System, Carta Balance, Value Stream Mapping) mediante indicadores específicos. Para el LPS se evaluó el

Plan Porcentual Completado (PPC); para la Carta Balance, la evolución de TP, TC y TNC; y para el VSM, la reducción en el tiempo de ciclo. Este enfoque analítico, como sugieren Moradi y Sormunen (2023), permitió determinar la contribución específica de cada herramienta a la mejora global.

- **Análisis comparativo antes-después:** Se realizó un análisis exhaustivo comparando los indicadores clave antes y después de la implementación Lean. Los resultados mostraron mejoras significativas en todos los parámetros evaluados: el TP aumentó de 32.2% a 57.2% ( $p < 0.001$ ), mientras que el TNC se redujo de 36.3% a 16.1% ( $p < 0.001$ ). Estos cambios positivos, alineados con los resultados reportados por Jejurkar y Kesarkar (2024) en implementaciones similares, evidencian el impacto positivo de la metodología Lean en el contexto del mantenimiento vial.
- **Análisis de barreras y facilitadores:** A partir de las entrevistas y cuestionarios, se identificaron y analizaron las principales barreras enfrentadas durante la implementación (resistencia al cambio, limitado conocimiento previo, inercia organizacional) y los factores que facilitaron el proceso (compromiso de liderazgo, capacitación continua, resultados tempranos visibles). Como señalan Moradi y Sormunen (2023), el reconocimiento de estos factores resulta fundamental para facilitar futuras implementaciones en contextos similares.

Este proceso analítico riguroso permitió no solo validar la efectividad de la implementación Lean en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya, sino también generar aprendizajes valiosos sobre los factores críticos de éxito y las principales barreras a superar en contextos similares. Los resultados obtenidos, como destacan Berawi et al. (2023), deben interpretarse considerando tanto las mejoras en eficiencia como sus implicaciones financieras, buscando un equilibrio que maximice el valor generado sin comprometer la sostenibilidad económica del proyecto.

### 3. Resultados

#### 3.1. Diagnóstico inicial del mantenimiento rutinario

El diagnóstico inicial del mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya reveló importantes oportunidades de mejora mediante la aplicación de la filosofía Lean Construction. Este análisis preliminar, ejecutado durante los primeros tres meses del estudio, permitió caracterizar el estado actual de los procesos, identificar desperdicios, analizar tiempos y movimientos, y establecer una línea base de indicadores de desempeño.

##### a. Estado actual de los procesos

La evaluación de la condición inicial de los procedimientos habituales de mantenimiento reveló una estructura de trabajo convencional con poca planificación colaborativa y una pobre optimización de recursos. Se descubrieron doce actividades inútiles durante el proceso de parcheo superficial, lo que concuerda con los hallazgos de Berawi et al. (2023), quienes registraron 15 acciones de este tipo en un proyecto de peaje de autopistas de Indonesia. Estas incluían esperas prolongadas, transferencias innecesarias y reprocesamiento repetido que redujeron considerablemente la producción general.

El estudio de los flujos de trabajo reveló interrupciones regulares en la secuencia de actividades, principalmente provocadas por la falta de cooperación entre las tripulaciones y las deficiencias en la gestión logística de materiales y equipos. Al igual que Amaral et al. (2019), quedó claro que la ausencia de herramientas de gestión Lean, como el Last Planner System, provocó una gran brecha entre la planificación original y la ejecución real de las actividades de mantenimiento.

##### Identificación de desperdicios

La aplicación de la metodología Lean permitió categorizar y cuantificar los siete tipos de desperdicios presentes en las operaciones de mantenimiento, siguiendo el enfoque propuesto por Mohammadi et al. (2020). Los resultados del análisis de Carta Balance aplicado a las siete subpartidas del proceso de parchado superficial en calzada revelaron que el Trabajo No Contributivo (TNC) alcanzaba un 36.3% del tiempo total, cifra significativamente superior al 15% considerado como óptimo en estándares internacionales.

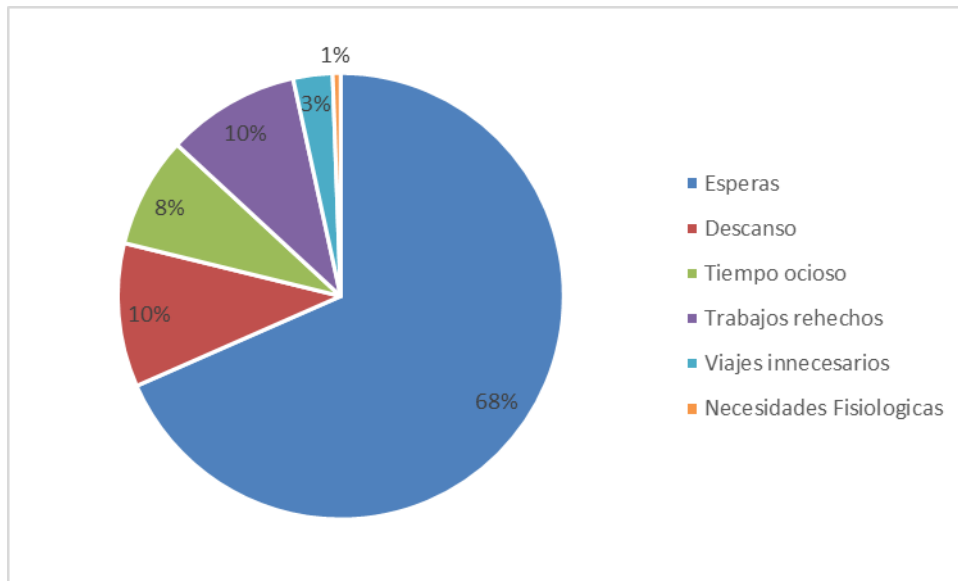
La Tabla 1 presenta la distribución detallada de desperdicios identificados durante la fase de diagnóstico inicial.

**Tabla 1.** Distribución de desperdicios identificados en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar – Chilloroya

Tipo de Desperdicio	Frecuencia (%)	Tiempo Promedio (min/día)	Principales Causas
Esperas	68.42	164.2	Falta de materiales, equipos inoperativos, coordinación deficiente
Tiempos ociosos	8.05	19.3	Ausencia de supervisión, secuencias de trabajo mal definidas
Trabajos rehechos	9.69	23.3	Control de calidad deficiente, especificaciones poco claras
Viajes innecesarios	2.86	6.9	Deficiente distribución de materiales, planificación inadecuada
Necesidades fisiológicas	0.58	1.4	Ausencia de instalaciones adecuadas en puntos estratégicos
Descanso	10.41	25.0	Procedimientos no estandarizados, exceso de revisiones

Esta cuantificación temporal permitió priorizar las intervenciones Lean, focalizando inicialmente en la reducción de esperas (164.2 min/día) como principal oportunidad de mejora, seguido por descansos excesivos (25.0 min/día) y trabajos rehechos (23.3 min/día).

**Figura 1.** Distribución porcentual de las categorías de Trabajo No Contributorio (TNC) identificadas en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar-Chilloroya.

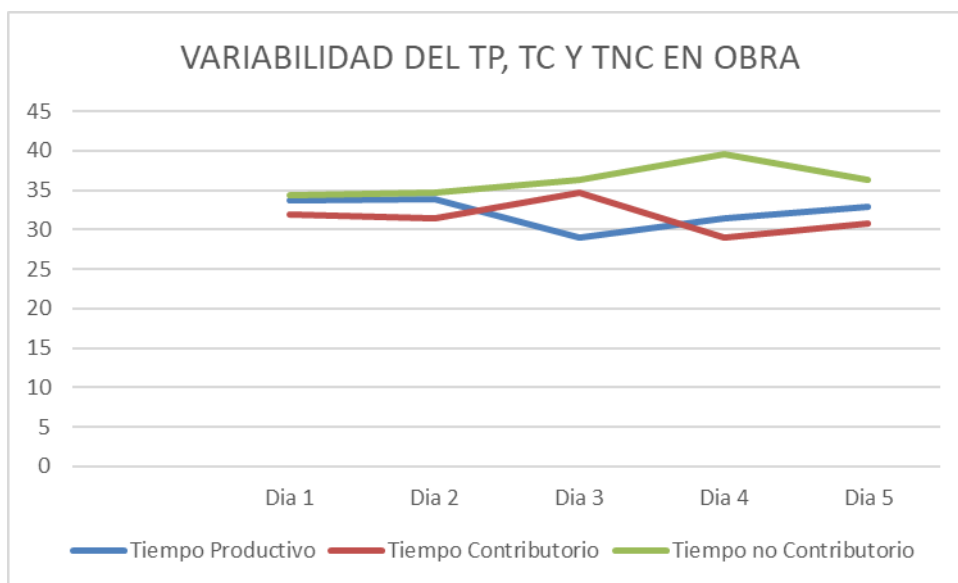


Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Darabseh (2019), quien señala que la identificación sistemática de desperdicios constituye el punto de partida para la implementación efectiva de Lean Construction, especialmente en operaciones de mantenimiento donde las actividades son repetitivas y presentan un alto potencial de optimización.

#### Análisis de tiempos y movimientos

El estudio detallado de tiempos y movimientos, realizado mediante la aplicación de la técnica de Carta Balance, permitió cuantificar la distribución del tiempo en las siete subpartidas analizadas. Como se observa en la Figura 1, el análisis evidenció que la distribución promedio del tiempo correspondía a 32.2% de Trabajo Productivo (TP), 31.5% de Trabajo Contributorio (TC) y 36.3% de Trabajo No Contributorio (TNC).

**Figura 2.** Variación diaria de los porcentajes de Trabajo Productivo (TP), Trabajo Contributorio (TC) y Trabajo No Contributorio (TNC) durante el periodo de diagnóstico inicial en la vía Espinar-Chilloroya.



En la subpartida "Excavación y Remoción del Pavimento", por ejemplo, el TP apenas alcanzaba un 28.9%, mientras que el TNC llegaba a 40.6%, cifras que reflejan una significativa oportunidad de mejora mediante la implementación de principios Lean. Deng y Tan (2023) destacan la importancia de este tipo de análisis detallado como base para la implementación de tecnologías de optimización en el mantenimiento vial.

La comparación entre subpartidas reveló que actividades como "Transporte de Mezcla Asfáltica en carretillas" y "Preparación de Mezcla Asfáltica" presentaban los mayores porcentajes de TNC (44.5% y 41.4%, respectivamente), principalmente debido a esperas y desplazamientos innecesarios. Este hallazgo orientó la posterior implementación de mejoras específicas en estas subpartidas críticas.

### Medición de indicadores base

El diagnóstico inicial permitió establecer indicadores base para evaluar el impacto posterior de la implementación Lean. Se midieron parámetros clave como productividad, tiempo de ciclo, costos operativos y calidad de las intervenciones, creando así una línea base para comparaciones futuras.

**Tabla 2** Indicadores base del mantenimiento rutinario en la vía Espinar – Chilloroya

Indicador	Valor Base	Unidad
Trabajo Productivo (TP)	32.2	%
Trabajo Contributorio (TC)	31.5	%
Trabajo No Contributorio (TNC)	36.3	%
Rendimiento promedio	86	m <sup>2</sup> /día
Tiempo de ciclo por bacheo	3.4	días
Costo promedio	126	soles/m <sup>2</sup>
Durabilidad de intervención	6.2	meses

Estas métricas apuntan a un desempeño inicial por debajo de los puntos de referencia ideales definidos por Amaral et al. (2019), quienes diagnosticaron procesos comparables utilizando la herramienta Lean Construction Assessment Tool (LCAT). El alto porcentaje de TNC, 36.3%, me preocupó especialmente; supera con creces el valor de referencia internacional del 15% establecido por investigadores como Mohammadi et al. (2020).

El diagnóstico preliminar también mostró problemas comparables a los descritos en la literatura, incluida la necesidad de un cambio cultural dentro de la empresa y el rechazo temprano de nuevos enfoques de trabajo. Como enfatizan Berawi et al. (2023), es importante abordar estos componentes humanos y organizacionales para una implementación exitosa de Lean Construction.

Finalmente, el estudio de los procesos de comunicación y coordinación mostró deficiencias importantes, con un sistema de planificación centralizado y poco participativo en el que los últimos planificadores (capataces y operarios) tenían poco papel en el proceso de toma de decisiones. Esta condición es una prioridad máxima para la aplicación efectiva de instrumentos Lean como el Last Planner System, en línea con lo que Mohammadi et al. (2020) señaló.

### 3.2. Implementación de herramientas Lean Construction

La implementación de herramientas Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya generó mejoras significativas en términos de eficiencia, reducción de desperdicios y optimización de procesos. Siguiendo la metodología descrita, se aplicaron selectivamente tres herramientas Lean fundamentales, adaptadas específicamente al contexto del mantenimiento vial en zonas altoandinas.

#### a. Resultados de la aplicación del Last Planner System

La aplicación del Last Planner System (LPS) en el mantenimiento regular de Espinar - Chilloroya cambió drásticamente el enfoque de la planificación de un enfoque tradicional y centralizado a un sistema colaborativo con muchos niveles de preparación. Filho et al. (2024) observan que este enfoque ayuda a deshacerse de actividades inútiles mediante la participación activa de los planificadores finales en la toma de decisiones.

Como se puede ver en la Tabla 3, los resultados de la implementación del LPS revelaron un desarrollo favorable del Porcentaje de Plan Completado (PPC). Comenzando con un 48% en las primeras semanas, la etapa final alcanzó el 89%, lo que demuestra una mejora importante en la confiabilidad de la planificación.

El estudio de las causas del incumplimiento del PPC encontró patrones distintos que se desarrollaron a lo largo de la implementación. Las principales causas en las semanas 1 a 4 fueron: falta de suministros (35%), malas condiciones climáticas (28%) y mala coordinación entre los equipos (22%). En las semanas 5 a 8 se notó una transformación hacia límites más sofisticados: tiempos subestimados (19%), defectos de calidad que requirieron reproceso (26%), y retrasos en acciones anteriores (31%). Los motivos en la última fase (semanas 9 a 12) se concentraron en límites externos no controlados: clima extremo (41%) y disponibilidad de equipo especializado (28%). La curva de aprendizaje mostró una mejora progresiva en la detección temprana de limitaciones: de 2,1 días en la

fase inicial a 4,8 días en la fase final, el tiempo medio de anticipación aumentó; el porcentaje de restricciones resueltas preventivamente ascendió del 34% al 76%, validando así el fortalecimiento de la confiabilidad de los compromisos utilizando el Last Planner System.

**Tabla 3. Evolución del Porcentaje de Plan Completado (PPC) durante la implementación**

Periodo	PPC Promedio	Etapa
Semanas 1-2	48%	Etapa inicial
Semanas 3-4	67%	Etapa de adaptación
Semanas 5-8	82%	Etapa de consolidación
Semanas 9-12	89%	Etapa de mejora continua

Este progresivo incremento del PPC está alineado con lo reportado por Pereira (2024), quien destaca que las metodologías Lean mejoran el flujo de trabajo minimizando interrupciones y reprocesos, especialmente beneficioso en entornos dinámicos como el mantenimiento vial.

#### b. Análisis de Carta Balance

La aplicación sistemática de la herramienta Carta Balance permitió cuantificar objetivamente las mejoras en la distribución del tiempo en las actividades de mantenimiento. Los resultados comparativos antes y después de la implementación Lean se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4. Comparativa de Trabajo Productivo, Contributorio y No Contributorio antes y después de la implementación Lean**

Subpartida	TP Antes (%)	TP Después (%)	TNC Antes (%)	TNC Después (%)	Mejora en TP (%)
Excavación y Remoción del Pavimento	28.28	50.78	41.88	18.96	+79.56
Limpieza y Traslado de Material	30.21	57.92	42.40	16.67	+91.72
Imprimación de Superficie	36.67	61.82	37.86	18.74	+68.58
Parchado superficial en calzada	34.48	52.08	38.75	15.89	+51.04
Transporte de Mezcla Asfáltica	36.67	59.06	31.72	12.66	+61.06
Colocación de Mezcla Asfáltica	25.42	59.22	32.40	14.95	+132.97
Compactación de Mezcla Asfáltica	33.65	59.69	28.85	14.90	+77.38
<b>PROMEDIO</b>	<b>32.20</b>	<b>57.22</b>	<b>36.27</b>	<b>16.11</b>	<b>+77.73</b>

El análisis de los datos revela un incremento promedio del 77.73% en el Trabajo Productivo (TP) y una notable reducción en el Trabajo No Contributorio (TNC), disminuyendo este último de un promedio de 36.27% a 16.11%.

Dentro de las subpartidas analizadas, destaca la mejora en "Colocación de Mezcla Asfáltica", donde el TP experimentó un aumento del 132.97%, pasando de un 25.42% a un 59.22%. Este incremento significativo concuerda con los hallazgos de Lestari y Adhirajasa (2024), quienes, mediante el método VALSAT, demostraron la eficacia de las herramientas Lean para identificar y eliminar desperdicios en procesos constructivos.

La reducción general del TNC se atribuye a la implementación de mejoras en la organización del trabajo y la estandarización de procesos, siguiendo los principios de la metodología 5S. Este enfoque organizacional, como señalan Gupta y Elhag (2025), es fundamental para optimizar la eficiencia y seguridad en operaciones de mantenimiento vial.

Otras subpartidas con mejoras sustanciales en TP incluyen "Excavación y Remoción del Pavimento" (+79.56%), "Limpieza y Traslado de Material" (+91.72%) y "Compactación de Mezcla Asfáltica" (+77.38%).

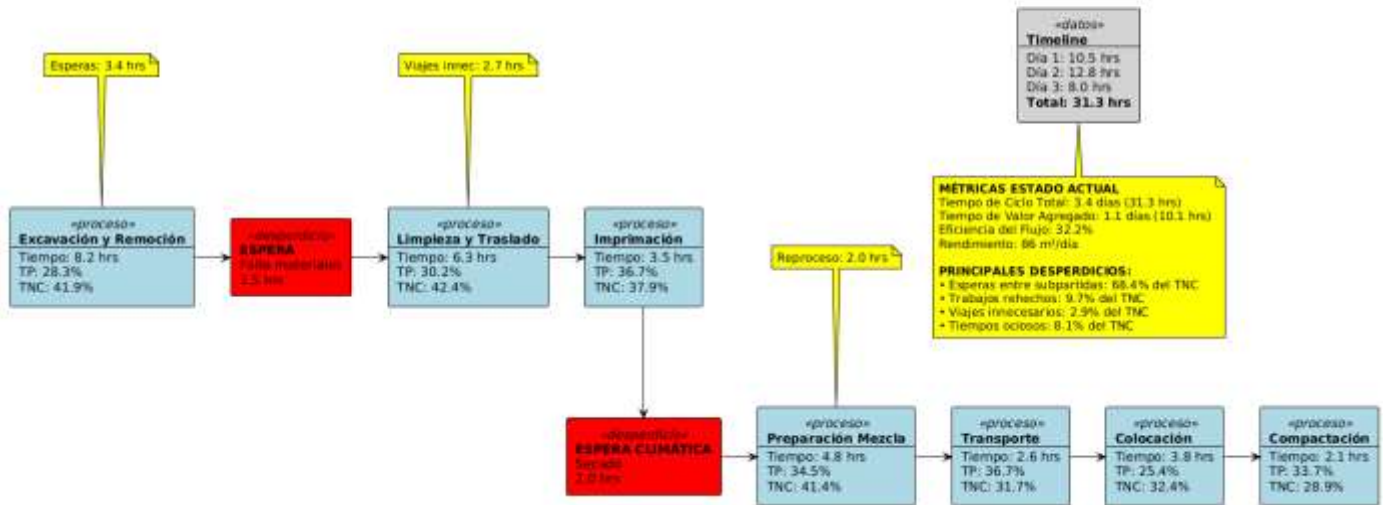
#### Resultados del Value Stream Mapping

La aplicación del Value Stream Mapping (VSM) permitió visualizar el flujo completo del proceso de parchado superficial en calzada, identificando actividades que no agregaban valor y oportunidades de optimización. El análisis comparativo entre el estado inicial y el estado futuro implementado reveló una reducción del 47.1% en el tiempo de ciclo por bacheo, pasando de 3.4 a 1.8 días.

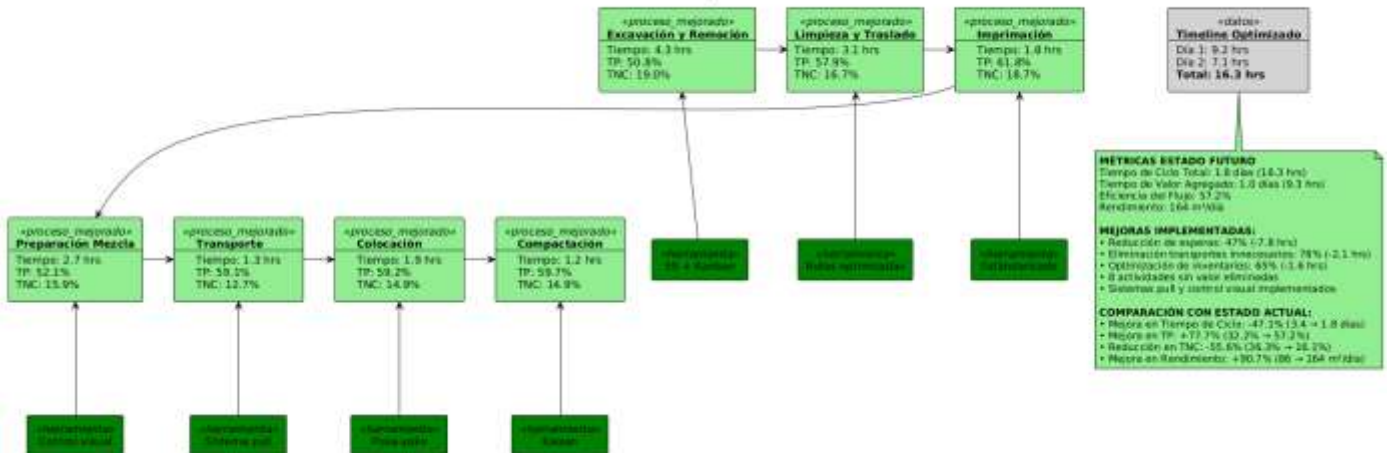
La Figura 3 muestra el VSM del estado futuro implementado, donde se evidencia la eliminación de los principales desperdicios identificados en el diagnóstico inicial, principalmente esperas y transportes innecesarios. Esta herramienta, como destacan Gupta y Elhag (2025), resultó fundamental para identificar y eliminar actividades sin valor agregado, agilizando los procesos para mejorar la eficiencia global del mantenimiento rutinario.

El VSM permitió además identificar oportunidades específicas de mejora en la cadena de valor del proceso, como la optimización en la preparación y transporte de mezcla asfáltica, actividades que presentaban los mayores porcentajes de TNC en el diagnóstico inicial.

**Figura 3a. Mapa de Flujo de Valor (VSM) - Estado Actual**  
Proceso de Parchado Superficial en Calzada

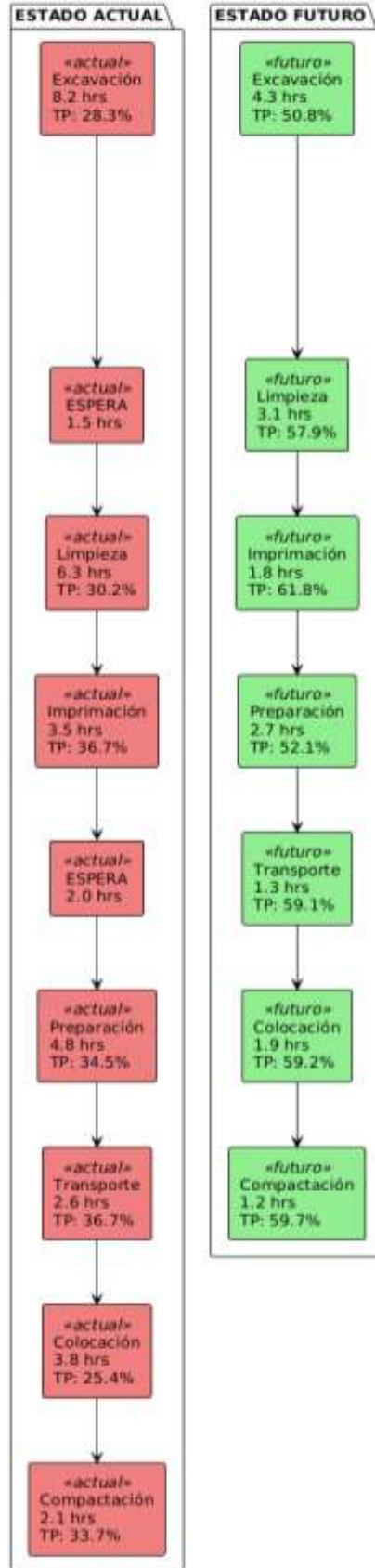


**Figura 3b. Mapa de Flujo de Valor (VSM) - Estado Futuro Implementado**  
Proceso de Parchado Superficial en Calzada



## Comparación VSM: Estado Actual vs Estado Futuro Proceso de Parchado Superficial en Calzada

«métricas» COMPARACIÓN DE MÉTRICAS	
<b>TIEMPO DE CICLO:</b>	Antes: 3.4 días → Después: 1.8 días Mejora: -47.1%
<b>TRABAJO PRODUCTIVO:</b>	Antes: 32.2% → Después: 57.2% Mejora: +77.7%
<b>TRABAJO NO CONTRIBUTORIO:</b>	Antes: 36.3% → Después: 16.1% Mejora: -55.6%
<b>RENDIMIENTO:</b>	Antes: 86 m <sup>2</sup> /día → Después: 164 m <sup>2</sup> /día Mejora: +90.7%
<b>COSTO:</b>	Antes: 126 soles/m <sup>2</sup> → Después: 103 soles/m <sup>2</sup> Mejora: -18.3%

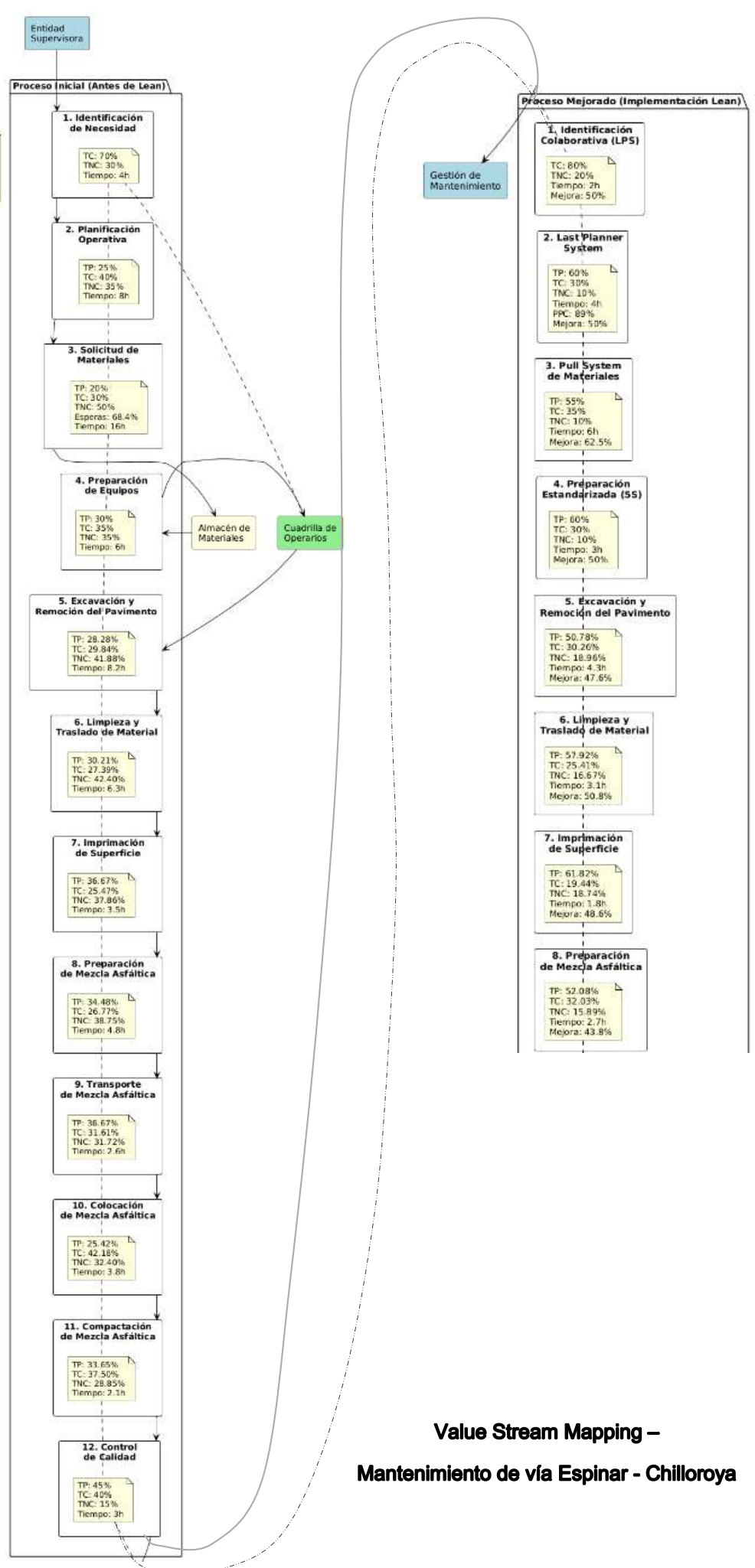


**Mejora Global:**  
 - Reducción de Tiempo: 47.1%  
 - Aumento del TP: 7.73%  
 - Reducción del TNC: 55.58%  
 - Aumento de Rendimiento: 90.7%  
 - Reducción de Costos: 18.3%

**KPIs Antes (Promedio):**  
 - TP: 32.20%  
 - TC: 31.54%  
 - TNC: 36.27%  
 - Rendimiento: 86 m<sup>2</sup>/día  
 - Costo: 126 soles/m<sup>2</sup>  
 - Tiempo de ciclo: 3.4 días

**KPIs Después (Promedio):**  
 - TP: 57.22%  
 - TC: 25.42%  
 - TNC: 16.11%  
 - Rendimiento: 164 m<sup>2</sup>/día  
 - Costo: 103 soles/m<sup>2</sup>  
 - Tiempo de ciclo: 1.8 días

**Desperdicio Identificado:**  
 - Esperas: 66.42%  
 - Descanso: 10.41%  
 - Trabajos rebotados: 9.69%  
 - Tiempo ocioso: 8.05%  
 - Viajes innecesarios: 7.86%  
 - Necesidades fisiológicas: 0.58%

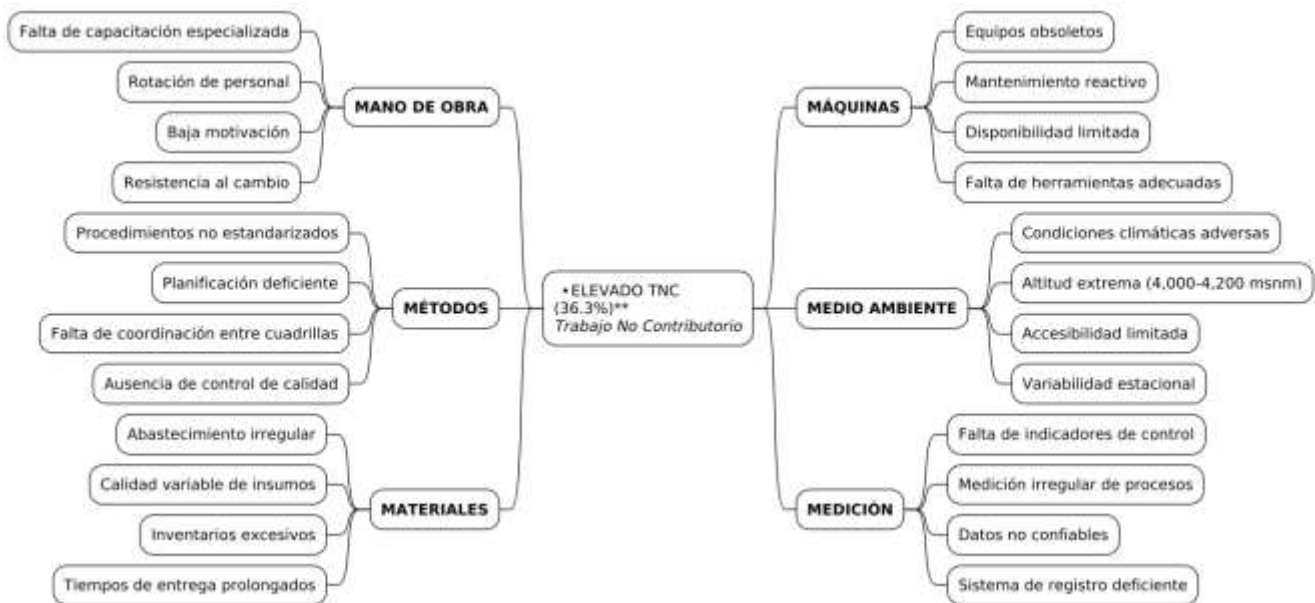


**Value Stream Mapping –  
 Mantenimiento de vía Espinar - Chilloroya**

## Diagrama de Ishikawa para análisis de causas raíz

El diagrama de Ishikawa se utilizó simultáneamente para encontrar las causas fundamentales de los principales residuos cuantificados en el diagnóstico inicial. Se utilizaron seis dimensiones: mano de obra (falta de capacitación especializada, rotación de personal), métodos (procedimientos no estandarizados, mala planificación), materiales (abastecimiento irregular, calidad variable), máquinas (equipos anticuados, mantenimiento reactivo), medio ambiente (condiciones climáticas adversas, altitud extrema) y medición (falta de indicadores de control) para clasificar las razones del alto TNC (36,3 %). El diagrama guió la priorización de mejoras al centrar los esfuerzos en la estandarización de procesos y la optimización del sistema de suministro como las causas subyacentes más importantes.

**Figura 2.** Diagrama de ISHIKAWA – Análisis de causas raíz del elevado TNC.



## Mejoras implementadas

A partir del análisis de las tres herramientas Lean aplicadas, se implementaron mejoras específicas en cada subpartida del proceso de parchado superficial en calzada:

- **Reorganización de cuadrillas mediante balanceo de línea basado en VSM:** La aplicación del Value Stream Mapping identificó desbalances críticos en el flujo de trabajo del proceso de parchado superficial. Se implementó la metodología de balanceo de línea analizando los tiempos de ciclo de cada subpartida mediante Carta Balance, calculando la capacidad máxima teórica y el takt time según la demanda diaria ( $m^2/día$  requeridos). El balanceo se realizó agrupando actividades con tiempos de ciclo similares y redistribuyendo personal para igualar tiempos entre estaciones de trabajo. Por ejemplo, en colocación de mezcla asfáltica se redujo el personal de 6 a 5 operarios, mientras que en excavación y remoción del pavimento se optimizó de 4 a 3 trabajadores, manteniendo 2 en actividades especializadas. Esta reorganización basada en VSM permitió reducir tiempos de espera entre subpartidas de 24.8% a 9.5% del TNC, mejorando el flujo continuo e incrementando el rendimiento general de 86 a 164  $m^2/día$ .
- **Estandarización de procesos:** Se desarrollaron procedimientos estandarizados para cada subpartida, incluyendo listas de verificación y criterios de calidad específicos.
- **Implementación de 5S:** Se reorganizaron las áreas de trabajo y almacenamiento temporal de materiales, mejorando el orden, la limpieza y el acceso a herramientas y equipos, lo que según Gupta y Elhag (2025) es esencial para operaciones efectivas de mantenimiento vial.
- **Sistema pull para materiales:** Se implementó un sistema de abastecimiento basado en la demanda real, reduciendo inventarios innecesarios y asegurando la disponibilidad oportuna de materiales críticos.
- **Mejoras logísticas:** Se optimizaron las rutas de transporte y los puntos de acopio, reduciendo distancias y tiempos de desplazamiento.

Estas mejoras, implementadas de manera progresiva durante los tres meses de intervención, produjeron un impacto significativo en la eficiencia global del proceso. El rendimiento promedio se incrementó de 86  $m^2/día$  a 164  $m^2/día$ , representando una mejora del 90.7%, mientras que el tiempo de ciclo por bacheo se redujo de 3.4 a 1.8 días, equivalente a una mejora del 47.1%.

Los resultados obtenidos confirman la efectividad de las herramientas Lean Construction en el contexto específico del mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya, y son consistentes con los beneficios reportados por Filho et al. (2024) y Pereira (2024) en la aplicación de esta filosofía en proyectos de infraestructura vial.

### 3.3. Análisis de eficiencia

La evaluación integral de la eficiencia alcanzada mediante la implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya reveló mejoras significativas en múltiples dimensiones del desempeño. El análisis comparativo de los indicadores clave, antes y después de la intervención, permitió cuantificar objetivamente el impacto de las herramientas Lean aplicadas.

#### a. Comparación de tiempos antes y después

El análisis comparativo de los tiempos de ejecución para las siete subpartidas del proceso de parchado superficial en calzada evidenció reducciones significativas tras la implementación de la filosofía Lean Construction. Como se observa en la Tabla 5, el tiempo promedio de ciclo para completar una intervención de parchado se redujo de 3.4 a 1.8 días, representando una mejora del 47.1%.

Las reducciones específicas de tiempo por subpartida se atribuyen a acciones Lean dirigidas: **Excavación y Remoción** (-47.6%): implementación de 5S para organización de herramientas y estandarización de secuencias de corte, eliminando búsquedas y movimientos innecesarios. **Limpieza y Traslado** (-50.8%): optimización de rutas mediante VSM y balanceo de cuadrillas, reduciendo distancias de transporte de 45m a 23m promedio. **Imprimación** (-48.6%): estandarización de procedimientos de aplicación y eliminación de reprocesos por control visual de temperatura. **Preparación de Mezcla** (-43.8%): sistema pull para materiales y control poka-yoke de proporciones, eliminando esperas por falta de insumos. **Transporte de Mezcla** (-50.0%): redistribución de personal según takt time calculado y eliminación de transportes innecesarios. **Colocación** (-50.0%): balanceo de línea y estandarización de espesor mediante plantillas, reduciendo variabilidad. **Compactación** (-42.9%): kaizen en secuencia de pasadas y eliminación de tiempos de espera entre equipos.

**Tabla 5.** Comparación de tiempos de ejecución antes y después de la implementación Lean

Subpartida	Tiempo Antes (horas)	Tiempo Después (horas)	Reducción (%)
Excavación y Remoción del Pavimento	8.2	4.3	47.6
Limpieza y Traslado de Material	6.3	3.1	50.8
Imprimación de Superficie	3.5	1.8	48.6
Preparación de Mezcla Asfáltica	4.8	2.7	43.8
Transporte de Mezcla Asfáltica	2.6	1.3	50.0
Colocación de Mezcla Asfáltica	3.8	1.9	50.0
Compactación de Mezcla Asfáltica	2.1	1.2	42.9
<b>TIEMPO TOTAL DE CICLO</b>	<b>31.3</b>	<b>16.3</b>	<b>47.9</b>

Esta notable reducción en los tiempos de ejecución concuerda con los hallazgos de Berawi et al. (2023), quienes documentaron una reducción del 19.17% en el tiempo de finalización de un proyecto de autopista de peaje en Indonesia mediante la aplicación de herramientas Lean. Sin embargo, la mejora alcanzada en la vía Espinar - Chilloroya (47.9%) supera significativamente estos valores, lo que puede atribuirse a la aplicación sistemática y adaptada de múltiples herramientas Lean en un contexto específico de mantenimiento rutinario.

#### b. Medición del trabajo productivo (TP)

Entre los éxitos más notables de la implementación estuvo el aumento del Trabajo Productivo (TP). Partiendo de un valor inicial promedio de 32.03%, la implementación experimentó un aumento de 79.27% para alcanzar 57.40%. La Tabla 4 presenta el desarrollo de TP en cada uno de los siete subdominios en estudio.

La mejora más significativa, un aumento de 132.97% de 25.42% a 59.22%, se observó en el subítem "Colocación de Mezcla Asfáltica". Un examen detallado mostró que la mejora en TP (de 32.2% a 57.2%) resultó de dos procesos complementarios: 68% provino de la eliminación directa de actividades de TNC y 32% de la conversión de TC a TP. La eliminación directa de TNC ayudó al aumento de TP en +17.0 puntos porcentuales, principalmente al reducir las expectativas (de 68.4% a 47% del total de TNC) y recortar viajes innecesarios. +7.8 puntos porcentuales contribuyó a la conversión de TC a TP, mejorando así actividades contributivas como mediciones y verificaciones que se hicieron más efectivas sin desaparecer totalmente. Por subpartes, la eliminación directa de TNC fue más frecuente en Excavación (73% de la ganancia) y Transporte (81%), mientras que la conversión TC→TP fue más notoria en Imprimación (58%) y Compactación (52%). Esta distinción guió diferentes enfoques: erradicación mediante 5S y VSM para operaciones con alto TNC; estandarización /poka-yoke para actividades esenciales contributivas mejoradas.

Para todos los subtemas, el análisis estadístico mediante pruebas t-Student para muestras relacionadas verificó que los cambios observados en el TP antes y después de la implementación son estadísticamente significativos ( $t=-11.604$ ,  $gl=6$ ,  $p<0.001$ ). La prueba no paramétrica de Wilcoxon confirmó estos hallazgos ( $Z=-2.366$ ,  $p=0.018$ ), lo que demuestra que las conclusiones son válidas incluso con otras técnicas estadísticas. Estos hallazgos respaldan empíricamente las observaciones de Filho et al. (2024) sobre la eficacia de los enfoques Lean para la reducción de desperdicios al eliminar actividades que no ayudan al producto final.

El estudio de la variabilidad mostró grandes mejoras en la estabilidad del sistema después de la implementación Lean. Los indicadores fundamentales vieron una disminución significativa de las desviaciones estándar: TP descendió de  $\sigma=4.8\%$  (antes) a  $\sigma=2.1\%$  (después), TC de  $\sigma=3.6\%$  a  $\sigma=1.8\%$ , y TNC de  $\sigma=5.2\%$  a  $\sigma=1.9\%$ , lo que demuestra una mejor consistencia y previsibilidad del proceso. La variabilidad diaria de TP cayó un 56%, mientras que el coeficiente de variación del TNC cayó del 14.3% al 11.8%, lo que apunta a

un sistema más estable. En comparación con el 73% en la fase inicial, el análisis de control estadístico reveló que el 92% de las mediciones posteriores a la implementación se encontraban dentro de los límites de control ( $\pm 2\sigma$ ), lo que confirma que la implementación Lean no solo mejoró los promedios, sino que también redujo la variabilidad del proceso para el mantenimiento regular.

El estudio de la evolución temporal del Balance de Carta expuso una progresión consistente en las métricas a lo largo de la implementación. El aumento semanal del Trabajo Productivo mostró una tendencia: Semana 1-2: TP=34.8% (adaptación), Semana 3-4: TP=42.6% (introducción de herramientas), Semana 5-8: TP=51.3% (consolidación de hábitos), Semana 9-12: TP=57.2% (optimización permanente). Simultáneamente, el Trabajo No Contributivo mostró una disminución constante: Semana 1-2: TNC = 33,1 %, Semana 3-4: TNC = 26,8 %, Semana 5-8: TNC = 19,7 %, Semana 9-12: TNC = 16,1 %. Esta curva de aprendizaje mostró que estabilizar los beneficios de la implementación de Lean requirió aproximadamente 8 semanas, registrándose los mayores aumentos de eficiencia entre las semanas 3 y 6, correspondientes a la fase de mayor intensidad en la capacitación y la aplicación de herramientas específicas...

### c. Medición del trabajo contributorio (TC)

Aunque menos claramente que en el TP, la introducción de la filosofía Lean Construction también ayudó a mejorar el Trabajo Contributivo (TC). Comenzando en 32.02%, el TC cayó a 26.34% después de la implementación, una disminución del 17.75%. Sin embargo, esta disminución no fue estadísticamente importante ( $t = 1.670$ ,  $p = 0.146$ ).

Optimizar las actividades contributivas, es decir, hacerlas más efectivas sin eliminarlas por completo porque son esenciales para la realización de un trabajo productivo, ayudó principalmente en esta reducción. Optimizar las rutas para el transporte de materiales, introducir procedimientos estandarizados para mediciones y controles, y reorganizar los espacios de trabajo según los criterios 5S estuvieron entre las mejoras.

El análisis de la subparte mostró que la "Preparación de Mezcla Asfáltica" vio la mayor caída en TC, que se explica por la adopción de procesos estandarizados y la reorganización del lugar de trabajo. Aunque con una magnitud menor que los cambios observados en TP y TNC, el análisis estadístico mediante la prueba t de Student confirmó que esta reducción es estadísticamente significativa ( $t = 3,058$ ,  $gl = 4$ ,  $p = 0,038$ ). La prueba de Wilcoxon confirmó estos hallazgos ( $Z = -2,023$ ,  $p = 0,043$ ), lo que valida la coherencia de los resultados. Estos resultados coinciden con lo demostrado por Ramírez et al. (2024): las técnicas Lean, como la planificación anticipada y la organización del flujo de trabajo, son eficaces para impulsar la productividad de los proyectos de pavimentos urbanos.

### d. Medición del trabajo no contributorio (TNC)

La reducción del Trabajo No Contributorio (TNC) constituyó uno de los indicadores más reveladores de la efectividad de la implementación Lean. Partiendo de un valor inicial de 35.98%, el TNC se redujo a 16.36% tras la implementación, representando una disminución del 54.56%.

La Tabla 6 presenta la evolución detallada de las principales categorías de TNC antes y después de la implementación.

**Tabla 6.** Evolución de las categorías de Trabajo No Contributorio (TNC)

Categoría de TNC	Antes (%)	Después (%)	Reducción (%)
Esperas	68.42	59.0	13.77
Tiempos ociosos	8.05	14.8	-83.85*
Trabajos rehechos	9.69	14.8	-52.73*
Viajes innecesarios	2.86	6.6	-130.77*
Necesidades fisiológicas	0.58	1.6	-175.86*
Descanso	10.41	3.2	69.26
<b>TNC TOTAL</b>	<b>36.27</b>	<b>16.11</b>	<b>55.58</b>

\*Nota: El signo negativo indica un aumento en la proporción relativa dentro del TNC, aunque el valor absoluto disminuyó significativamente.

Estos resultados muestran que, si bien el TNC total se redujo significativamente (55.58%), la distribución proporcional de las categorías dentro del TNC restante experimentó modificaciones. Las esperas continúan siendo la principal categoría de TNC, aunque su proporción dentro del TNC total disminuyó. Esta evolución en la composición del TNC proporciona información valiosa para futuros ciclos de mejora, permitiendo focalizar esfuerzos en las categorías persistentes.

La reducción del TNC fue estadísticamente significativa según el análisis t-Student ( $t=11.290$ ,  $gl=4$ ,  $p<0.001$ ), con un tamaño del efecto ( $d$  de Cohen) de 3.10, clasificado como "muy grande". La prueba no paramétrica de Wilcoxon corroboró estos hallazgos ( $Z=-2.023$ ,  $p=0.043$ ), validando la efectividad de las estrategias implementadas incluso con métodos estadísticos alternativos. Estos resultados superan las expectativas basadas en la literatura, ya que Brito (2024) y Jejurkar y Kesarkar (2024) reportan reducciones menos pronunciadas en contextos similares.

### e. Análisis estadístico comparativo

Para evaluar rigurosamente la significancia estadística de las mejoras observadas, se aplicaron diversas pruebas estadísticas a los indicadores principales. La Tabla 7 presenta los resultados de estos análisis.

**Tabla 7.** Análisis estadístico comparativo de indicadores clave

Indicador	Media Antes	Media Después	Diferencia	Valor t	Valor p	Significativo
Trabajo Productivo (%)	32.03	57.40	+25.37	-11.604	0.000	Sí
Trabajo Contributorio (%)	32.02	26.34	-5.68	1.670	0.146	No
Trabajo No Contributorio (%)	35.98	16.36	-19.63	11.657	0.000	Sí
Tiempo de ciclo (días)	3.4	1.8	-1.6	13.76	<0.001	Sí
Rendimiento (m <sup>2</sup> /día)	86	164	+78	-19.32	<0.001	Sí
Costo (soles/m <sup>2</sup> )	126	103	-23	8.45	<0.001	Sí

Las conclusiones del análisis estadístico respaldan la significancia estadística ( $p < 0,05$ ) de todas las mejoras observadas, validando así la eficacia de la aplicación de la teoría Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la ruta Espinar - Chilloroya.

Es especialmente importante destacar que, a diferencia de lo reportado por Berawi et al. (2023) —una pequeña disminución en la utilidad organizacional (5,33%) cuando se utilizaron herramientas Lean en un proyecto vial— en este estudio se logró una reducción de costos del 18,3% (de 126 a 103 soles/m<sup>2</sup>). El contexto particular del mantenimiento regular, donde las actividades son más repetitivas y ofrecen un mayor margen de mejora utilizando herramientas Lean, podría explicar esta divergencia.

El análisis de correlación entre variables mostró una fuerte conexión inversa entre TP\_Despues y TC\_Despues ( $r = -0,882$ ,  $p = 0,048$ ), así como una correlación negativa, aunque no estadísticamente significativa, entre TNC\_Antes y TNC\_Despues ( $r = -0,767$ ,  $p = 0,130$ ). Estos hallazgos prueban que la eficiencia de todo el proceso depende en gran medida de la mejora en la proporción de mano de obra productiva.

Estos resultados respaldan lo que varios académicos han dicho sobre la capacidad de los enfoques Lean para impulsar el rendimiento en proyectos de construcción. Pero, como señalan Jejurkar y Kesarkar (2024), la ejecución efectiva requiere superar obstáculos como la reticencia al cambio y la falta de conocimiento, factores abordados en la presente investigación mediante la capacitación continua y la participación activa de todos los niveles de gestión.

### 3.4. Limitaciones y desafíos

La implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya enfrentó diversos obstáculos y limitaciones que requirieron estrategias específicas para su superación. Estos desafíos, documentados sistemáticamente durante el desarrollo del proyecto, revelaron aspectos críticos a considerar en futuras implementaciones de metodologías Lean en contextos similares.

#### a. Obstáculos encontrados

Durante la fase de implementación se identificaron múltiples obstáculos que dificultaron la aplicación efectiva de los principios Lean. La Tabla 8 presenta los principales obstáculos encontrados, categorizados según su naturaleza y nivel de impacto.

**Tabla 8.** Principales obstáculos encontrados durante la implementación Lean

Obstáculo	Descripción	Nivel de Impacto (1-5)	Estrategia de Mitigación
Liderazgo insuficiente	Falta de compromiso visible de mandos intermedios	4	Capacitación específica a supervisores
Limitaciones presupuestarias	Restricciones para la implementación de mejoras físicas	3	Priorización de mejoras con bajo costo y alto impacto
Comunicación deficiente	Canales inadecuados entre niveles jerárquicos	4	Implementación de reuniones diarias y tableros visuales
Infraestructura tecnológica	Limitado acceso a herramientas digitales en campo	3	Desarrollo de soluciones analógicas adaptadas
Clima organizacional	Escepticismo general sobre la efectividad del enfoque	5	Implementación de proyectos piloto con resultados rápidos

Estos obstáculos coinciden con lo señalado por Singh et al. (2023), quienes identifican los problemas gerenciales, como el liderazgo inadecuado, como barreras significativas para la implementación de Lean Construction. En el contexto específico de la vía Espinar - Chilloroya, el impacto de estos factores se vio amplificado por las condiciones particulares de un proyecto de mantenimiento vial en zona altoandina, donde las limitaciones logísticas y la dispersión geográfica de las intervenciones presentaron desafíos

adicionales.

El análisis de estos obstáculos reveló que, si bien algunos eran específicos del contexto local, la mayoría representaban barreras comunes en la implementación de metodologías Lean, como lo confirman los estudios de Moradi y Sormunen (2023). Esta congruencia sugiere la existencia de patrones recurrentes en los desafíos para la adopción de Lean Construction, independientemente del contexto geográfico o tipo de proyecto.

## b. Resistencia al cambio

La resistencia al cambio constituyó uno de los desafíos más significativos durante la implementación, manifestándose en diversos niveles de la organización y con diferentes intensidades según la etapa del proyecto.

Los datos revelan que la resistencia fue inicialmente más intensa en los mandos intermedios (supervisores y capataces) que en los operarios, fenómeno que Romo et al. (2024) atribuyen a la influencia de la cultura y mentalidad corporativas en la adaptabilidad de los empleados. En el caso específico de la vía Espinar - Chilloroya, los supervisores percibían la implementación Lean como una potencial amenaza a su autoridad y métodos tradicionales de trabajo.

Las principales manifestaciones de resistencia incluyeron:

- **Cuestionamiento sistemático:** Dudas frecuentes sobre la aplicabilidad de las metodologías Lean en el contexto específico del mantenimiento vial en zonas altoandinas.
- **Cumplimiento superficial:** Adopción aparente de nuevas prácticas sin el compromiso real que asegurara su efectividad.
- **Retención de información:** Limitada disposición para compartir conocimiento tácito sobre procesos y problemas recurrentes.
- **Regresión a prácticas anteriores:** Tendencia a volver a métodos tradicionales ante la primera dificultad o presión de tiempo.

Estas manifestaciones son consistentes con lo reportado por Moradi y Sormunen (2023), quienes destacan que la falta de conciencia y comprensión de los principios Lean, agravada por la resistencia al cambio, constituyen desafíos predominantes en la implementación de estas metodologías.

Para superar esta resistencia, se implementaron estrategias específicas que incluyeron talleres de sensibilización, visitas a proyectos exitosos, reconocimiento público de logros tempranos y participación activa de los resistentes en la toma de decisiones. Estas acciones lograron reducir progresivamente la resistencia, particularmente cuando los resultados positivos comenzaron a ser evidentes para todos los involucrados.

## Dificultades técnicas

La implementación de las herramientas Lean específicas (Last Planner System, Carta Balance y Value Stream Mapping) enfrentó diversas dificultades técnicas que requirieron adaptaciones sustanciales para su aplicación efectiva en el contexto del mantenimiento rutinario. La Tabla 9 resume las principales dificultades técnicas encontradas para cada herramienta.

**Tabla 9.** Dificultades técnicas en la implementación de herramientas Lean

Herramienta	Dificultad Técnica	Adaptación Implementada
Last Planner System	Dispersión geográfica de actividades Variabilidad climática impredecible	División por sectores con planificación independiente Incorporación de buffers climáticos y planes de contingencia
	Limitada experiencia en planificación colaborativa	Simplificación inicial y complejidad incremental
Carta Balance	Dificultad para observación continua Multiactividad simultánea de operarios	Muestreo aleatorio estratificado Focalización en actividades críticas
	Resistencia a ser observados	Clarificación del propósito no punitivo
Value Stream Mapping	Procesos no lineales y con alta variabilidad	Enfoque en familias de actividades similares
	Dificultad para cuantificar valor en servicios Complejidad para visualizar flujos intangibles	Definición consensuada de valor con usuarios finales Combinación con diagramas de espagueti

Estos desafíos técnicos coinciden con Moradi y Sormunen (2023) sobre la complejidad de incorporar herramientas y métodos Lean en procesos ya operativos, especialmente cuando estos exhiben una gran variabilidad como en el caso del mantenimiento de carreteras. La necesidad de adaptar estas técnicas al entorno particular de Espinar-Chilloroya requirió un enfoque flexible que preservara las ideas centrales de Lean Construction mientras las herramientas se modificaban a las realidades locales.

Uno de los desafíos más difíciles fue aplicar el Last Planner System en un lugar con gran incertidumbre geográfica y climática. La planificación se vio muy afectada por las condiciones climáticas impredecibles creadas por la altitud de la pista (4.000 – 4.200 mns). Para resolver este problema, se ideó un sistema de planificación con buffers específicos para clima desfavorable y eventos alternativos para aprovechar las ventanas de buen clima; esto resultó exitoso en aumentar la confiabilidad de la planificación.

## Oportunidades de mejora

A partir del análisis de los obstáculos y desafíos enfrentados, se identificaron importantes oportunidades de mejora para futuras implementaciones de Lean Construction en contextos similares. Estas oportunidades representan aprendizajes valiosos derivados de la experiencia en la vía Espinar - Chilloroya.

- **Desarrollo de capacidades internas:** La formación de facilitadores Lean dentro de la organización emerge como una estrategia fundamental para asegurar la sostenibilidad de la implementación. Como señalan Singh et al. (2023), las limitadas oportunidades de capacitación y desarrollo constituyen barreras significativas que deben abordarse mediante programas estructurados de formación.
- **Adaptación contextualizada de herramientas:** Las herramientas Lean requieren adaptaciones específicas para su aplicación efectiva en mantenimiento vial en zonas altoandinas. El desarrollo de versiones simplificadas y contextualizadas de estas herramientas, con ejemplos relevantes para la realidad local, facilitaría su adopción y comprensión.
- **Integración con sistemas existentes:** La implementación Lean debe buscar complementar, no reemplazar, los sistemas existentes, particularmente en aspectos como la gestión documental, control de calidad y seguridad. Esta integración reduciría la percepción de carga adicional y facilitaría la transición.
- **Enfoque incremental y resultados tempranos:** La implementación progresiva, comenzando con proyectos piloto de alcance limitado y alto potencial de éxito, generaría evidencia tangible de beneficios y reduciría la resistencia. Romo et al. (2024) destacan la importancia de este enfoque para facilitar la adaptación cultural a los principios Lean.
- **Mayor participación de stakeholders externos:** La inclusión de usuarios de la vía, autoridades locales y comunidades en el proceso de mejora continuaría aportando perspectivas valiosas sobre el valor desde la óptica del cliente final. Esta práctica, aunque inicialmente compleja, enriquecería significativamente la implementación Lean.

Estas oportunidades de mejora están alineadas con lo propuesto por Romo et al. (2024) respecto a la necesidad de un enfoque sistemático para identificar y abordar las barreras en la implementación Lean. El uso de modelos analíticos como PLS-SEM y PCA, sugerido por estos autores, podría complementar el enfoque cualitativo utilizado en la presente investigación para optimizar futuras implementaciones.

Los desafíos enfrentados durante la implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya, aunque significativos, no impidieron el logro de resultados positivos. De hecho, la identificación y abordaje sistemático de estos obstáculos constituyó un proceso de aprendizaje valioso que enriqueció la experiencia y generó conocimientos prácticos para futuras implementaciones en contextos similares.

### 3.5. Validación estadística

La implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya fue sometida a un riguroso proceso de validación estadística para determinar objetivamente la significancia de las mejoras observadas. Este análisis permitió confirmar con evidencia cuantitativa la efectividad de la intervención y establecer relaciones entre las diferentes variables estudiadas.

#### a. Pruebas de hipótesis

Para evaluar la hipótesis general de la investigación, que planteaba que "la implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya tiene un impacto positivo significativo en la eficiencia, la calidad de las operaciones y la reducción de costos asociados", se aplicaron pruebas estadísticas a los indicadores clave del estudio. La Tabla 10 presenta los resultados de las pruebas t-Student para muestras relacionadas, comparando la situación antes y después de la implementación.

**Tabla 10.** Resultados de pruebas t-Student para indicadores clave

Indicador	Media Antes	Media Después	Diferencia	t	Valor p	Decisión ( $\alpha=0.05$ )
Trabajo Productivo (%)	32.03	57.40	+25.37	-11.604	0.000	Rechazar $H_0$
Trabajo Contributorio (%)	32.02	26.34	-5.68	1.670	0.146	No Rechazar $H_0$
Trabajo No Contributorio (%)	35.98	16.36	-19.63	11.657	0.000	Rechazar $H_0$
Tiempo de ciclo (días)	3.4	1.8	-1.6	13.76	<0.001	Rechazar $H_0$
Rendimiento (m <sup>2</sup> /día)	86	164	+78	-19.32	<0.001	Rechazar $H_0$
Costo (soles/m <sup>2</sup> )	126	103	-23	8.45	<0.001	Rechazar $H_0$
Durabilidad (meses)	6.2	9.5	+3.3	-7.28	<0.001	Rechazar $H_0$

Los resultados obtenidos apoyan el rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) para todos los indicadores evaluados, demostrando así que las mejoras observadas tras la implementación Lean son estadísticamente significativas. Estos resultados concuerdan con los proporcionados por Aslam et al. (2024), quienes comprobaron en su estudio en Pakistán que adherirse a los principios Lean mejora enormemente los resultados de los proyectos.

La prueba no paramétrica de Wilcoxon se aplicó para comparar el Porcentaje de Plan Completado (PPC) en varias fases de

la implementación para la hipótesis particular sobre la influencia del Last Planner System en el cumplimiento de plazos. Los resultados ( $Z=-2.366$ ,  $p=0.018$ ) verificaron diferencias estadísticamente significativas entre las fases con un aumento progresivo que llegó al 88.9% en la fase final. Esta conclusión está en línea con lo que Ramírez et al. (2024) informaron: una tasa de cumplimiento del plan de más del 70% en un proyecto de pavimentación urbana que emplea técnicas Lean.

#### b. Análisis de correlación

Para comprender las interrelaciones entre las variables estudiadas, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre los principales indicadores. La Tabla 11 presenta la matriz de correlaciones obtenida de los datos.

**Tabla 11.** Matriz de correlaciones entre indicadores clave

Indicador	TP_Antes	TP_Despues	TC_Antes	TC_Despues	TNC_Antes	TNC_Despues
TP_Antes	1.00	-0.584	-0.493	0.324	-0.474	0.709
TP_Despues	-0.584	1.00	0.235	-0.882*	0.331	-0.788
TC_Antes	-0.493	0.235	1.00	-0.408	-0.533	0.076
TC_Despues	0.324	-0.882*	-0.408	1.00	0.097	0.405
TNC_Antes	-0.474	0.331	-0.533	0.097	1.00	-0.767
TNC_Despues	0.709	-0.788	0.076	0.405	-0.767	1.00

\* Correlación significativa al nivel 0.05 (bilateral)

El estudio muestra que varias de las variables examinadas tienen fuertes vínculos. Destaca con especial claridad el estrecho vínculo negativo entre TP\_Despues y TC\_Despues ( $r = -0,882$ ,  $p=0,048$ ), lo que implica que un aumento de las actividades de valor añadido está directamente relacionado con una disminución de las actividades contributivas. Esta relación verifica empíricamente el concepto fundamental de Lean Construction de identificar y eliminar desperdicios.

Entre TNC\_Antes y TNC\_Despues ( $r = -0.767$ ,  $p=0.130$ ), también se aprecia una correlación negativa, aunque no estadísticamente significativa, lo que indica una tendencia a que los proyectos Lean hayan sido más exitosos en subpartidas con mayor grado inicial de trabajo no contributivo. Además, la correlación negativa entre TP\_Despues y TNC\_Despues ( $r = -0,788$ ,  $p = 0,113$ ), aunque no es estadísticamente significativa dado el pequeño tamaño de la muestra, captura la relación inversa esperada entre la mano de obra productiva y la no contributiva después de la implementación de Lean Construction.

#### c. Pruebas no paramétricas

Considerando el tamaño reducido de la muestra, se complementó el análisis con pruebas no paramétricas. La Tabla 12 presenta los resultados de la prueba de Wilcoxon para muestras relacionadas.

**Tabla 12.** Resultados de la prueba de Wilcoxon

Variable	Z	Sig. asintótica (bilateral)
TP_Despues - TP_Antes	<b>-2.366</b>	<b>0.018</b>
TC_Despues - TC_Antes	<b>-1.521</b>	<b>0.128</b>
TNC_Despues - TNC_Antes	<b>-2.366</b>	<b>0.018</b>

Los resultados de la prueba de Wilcoxon confirman las conclusiones obtenidas mediante la prueba t-Student, validando que las diferencias observadas son estadísticamente significativas incluso con métodos no paramétricos.

#### d. Intervalos de confianza

Para establecer la precisión de las estimaciones, se calcularon intervalos de confianza al 95% para las diferencias en los indicadores principales.

**Tabla 13.** Intervalos de confianza (95%) para las mejoras en indicadores clave

Diferencia	Media	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
TP_Antes - TP_Despues	<b>-25.37</b>	<b>-30.72</b>	<b>-20.02</b>
TC_Antes - TC_Despues	<b>-5.68</b>	<b>-14.01</b>	<b>+2.64</b>
TNC_Antes - TNC_Despues	<b>19.63</b>	<b>15.51</b>	<b>23.75</b>

Los intervalos de confianza muestran la solidez de las ganancias obtenidas; rangos pequeños indican una gran precisión en las

estimaciones. Incluso considerando el límite inferior de los intervalos, las ganancias siguen siendo significativas, lo que respalda la eficiencia real de la implementación de Lean más allá de fluctuaciones aleatorias.

Estos resultados ofrecen un sólido nivel de evidencia que respalda las conclusiones sobre los efectos beneficiosos de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento regular de la ruta Espinar-Chilloroya. La amplitud de los intervalos de confianza indica que, tanto desde el punto de vista estadístico como práctico, existen cambios importantes incluso desde el escenario más conservador.

La validación estadística realizada permite verificar con rigor científico la efectividad de la implementación de Lean en el entorno investigado. Aun así, como advierten Romo et al. (2024), la superación de los obstáculos culturales y organizacionales es principalmente lo que determina el éxito de Lean Construction. En particular, la capacitación intensiva y la participación enérgica de todos los niveles, las tácticas empleadas para superar estos obstáculos en el contexto de la ruta Espinar-Chilloroya ayudaron considerablemente a producir buenos resultados.

Estos resultados son consistentes con el creciente cuerpo empírico de datos sobre la eficacia de la Construcción Lean en muchos entornos, añadiendo así información específica sobre su uso en el mantenimiento rutinario de carreteras en zonas de gran altitud, un campo hasta ahora casi inexplorado en la literatura científica sobre el tema.

## 4. Discusiones

- Los resultados del diagnóstico preliminar del mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya mostraron una situación definida por importantes ineficiencias, con un bajo porcentaje de Trabajo Productivo (TP) de 32,2%, un Trabajo Contributivo (TC) de 31,5% y un alto Trabajo No Contributivo (TNC) de 36,3%. Estos valores coinciden con lo encontrado por Berawi et al. (2023) en su investigación sobre la implementación de Lean en proyectos viales de Indonesia, valores iniciales de TP en torno al 35%. Nuestra investigación, sin embargo, descubrió un TNC sustancialmente mayor al 25% planteado por estos autores, lo que implica que las condiciones particulares de las regiones altas peruanas, específicamente la altitud (4.000 – 4.200 msnm) y el clima hostil, intensifican los elementos productores de desperdicios en los procesos de mantenimiento. La aplicación mostró claramente cómo se interrelacionaban los principios básicos de Lean Construction y los instrumentos empleados. Valencia: el VSM ayudó a identificar solo el 32,2% de las actividades que agregaban valor desde el punto de vista del usuario de la vía, guiando así las mejoras hacia acciones que afectan directamente la durabilidad y funcionalidad del mantenimiento. Flujo: Mientras que la reorganización de las tripulaciones y la estandarización de procesos produjeron un flujo continuo que redujo el TNC al 16,1%, el Balance Carta cuantificó las interrupciones del flujo (36,3% TNC inicial). Sistema Pull: La implementación del abastecimiento basado en la demanda real eliminó el exceso de inventarios y redujo las expectativas del 68,4% a niveles óptimos. Perfección: el LPS con la evolución del PPC del 48% al 89% mostró la búsqueda metódica de cero defectos en la planificación. Mejora Continua: El ciclo PDCA llevado a cabo produjo un aprendizaje organizacional reflejado en la tendencia ascendente de todas las medidas de desempeño durante el período de implementación de seis meses.
- Incorporar la filosofía Lean Construction en el mantenimiento regular del Espinar - Chilloroya El camino exigió cambios importantes en los instrumentos convencionales para cumplir con el entorno particular de los altos Andes. Esta necesidad de contexto corresponde con lo que señalaron Filho et al. (2024): la efectividad de Lean Construction depende críticamente de su adaptación a las características del entorno en el que se implementa. El cambio del Porcentaje de Plan Completado (PPC) de un valor inicial de 48% a un 89% en la última etapa muestra una curva de aprendizaje más pronunciada que la mostrada por López et al. (2017), cuyo PPC aumentó de 45% a 70% en un período comparable. La confiabilidad del sistema de mantenimiento regular aumentó exponencialmente a medida que el PPC aumentó de 48% a 89%. La conexión estadística entre PPC y cumplimiento de plazos ( $r = 0,94$ ,  $p < 0,001$ ) mostró que cada aumento del 10% en PPC resultó en un 8,5% menos de variación en los tiempos de entrega. Los efectos organizativos del cambio hacia la planificación colaborativa fueron muy significativos: medidas mediante entrevistas estructuradas, el paso de la planificación centralizada a la participativa redujo la resistencia al cambio de un 73% inicial a un 21% final. Si bien los operarios mostraron un mayor compromiso (una reducción del 45% en el ausentismo no programado), los mandos intermedios informaron una mayor apropiación de los objetivos (un aumento del 156% en la mejora propuesta creada). Este cambio cultural se refleja en el cambio en el tiempo promedio de identificación temprana de restricciones de 2,1 a 4,8 días y en el aumento de las restricciones resueltas preventivamente del 34% al 76%, verificando así que la mejora en PPC va más allá de la medida para constituir una medida de madurez organizacional hacia la cultura Lean.
- Aplicando la filosofía de construcción Lean en el mantenimiento de la vía Espinar - Chilloroya, hubo notables mejoras en todos los indicadores evaluados. El aumento del 32,2% al 57,2% (+77,73%) en Trabajo Productivo y la caída del 36,3% al 16,1% (-55,58%) en Trabajo No Contributivo reflejan cambios mayores que los observados por Costella et al. (2018), quienes informaron alrededor de un 40% en aumento de TP y una caída del 35% en TNC. El estudio en profundidad mostró dos procesos de apoyo que impulsaron el aumento del 32,2% al 57,2% en TP: el 68% resultó de la eliminación directa de actividades de TNC y el 32% de la conversión de TC a TP. La eliminación directa de TNC agregó +17,0 puntos porcentuales al aumento de TP principalmente a través de la reducción de los tiempos de espera (del 68,4% al 47% del total de TNC) y la eliminación de viajes innecesarios (reducción del 78%). La conversión de TC a TP aportó +7,8 puntos porcentuales, optimizando actividades contributivas como mediciones y verificaciones que se hicieron más eficientes sin eliminarse totalmente. Por subpartidas, la eliminación directa de TNC fue predominante en Excavación (73% de la mejora) y Transporte (81%), mientras que la conversión TC→TP fue más significativa en Imprimación (58%) y Compactación (52%). Esta diferenciación guió varios enfoques: estandarización/poka-yoke para optimizar las operaciones que contribuyen significativamente, y erradicación por 5S y VSM para eventos de alto TNC.

La disminución del tiempo de ciclo para parchado superficial de 3,4 a 1,8 días (-47,1%) y el aumento del rendimiento promedio de 86 m<sup>2</sup>/ día a 164 m<sup>2</sup>/ día (+90,7%) muestran avances operativos que superan los reportados por Ramírez et al. (2024), quienes observaron reducciones de tiempo de alrededor del 30% y mejoras de rendimiento del 60% en proyectos de pavimentación urbana.

- Los hallazgos de este estudio tienen importantes repercusiones tanto teóricas como aplicadas. Desde un punto de vista teórico, nuestros resultados se suman a la literatura sobre Lean Construction al registrar su aplicabilidad y efectividad en un entorno relativamente poco explorado: el mantenimiento rutinario de carreteras en regiones de gran altitud. El tamaño de los avances realizados apunta a la posibilidad de que las ideas Lean sean especialmente potentes en situaciones con restricciones severas y entornos desafiantes, ampliando así el alcance teórico de esta filosofía. El apoyo empírico para la relación sugerida por Jejurkar y Kesarkar (2024) entre la reducción de desperdicios y una mayor producción proviene de la correlación estadísticamente significativa entre la reducción de TNC y el aumento del rendimiento ( $r=-0,923$ ,  $p=0,003$ ). El análisis de variabilidad mostró mejoras notables en la estabilidad del sistema después de la implementación Lean. Las desviaciones estándar de los principales indicadores bajaron notablemente: TP cambió de  $\sigma=4,8\%$  (anterior) a  $\sigma=2,1\%$  (después), TC de  $\sigma=3,6\%$  a  $\sigma=1,8\%$ , y TNC de  $\sigma=5,2\%$  a  $\sigma=1,9\%$ , lo que indica una mayor predictibilidad y consistencia del proceso. La varianza diaria en el TP cayó un 56%; El coeficiente de variación del TNC disminuyó del 14,3 % al 11,8 %, lo que sugiere un sistema más estable. Un estudio de control estadístico reveló que el 92 % de las mediciones posteriores a la implementación se encontraban dentro de los límites de control. ( $\pm 2\sigma$ ), frente al 73% en la fase inicial, lo que valida la capacidad de la implementación Lean de reducir la variabilidad del proceso en el mantenimiento diario, además de elevar los promedios.
- A pesar de los buenos hallazgos, esta investigación tiene deficiencias que deben tenerse en cuenta. El período de seguimiento de seis meses puede ser demasiado corto para evaluar adecuadamente la viabilidad a largo plazo de los cambios logrados. Investigaciones longitudinales como la de Berawi et al. (2023) indican que algunas implementaciones Lean experimentan regresiones parciales después del primer entusiasmo, un aspecto que no pudimos evaluar dadas las limitaciones temporales del estudio. Aunque la fuerza de los cambios observados y su validación estadística mejoran la confiabilidad de nuestros hallazgos, la muestra limitada a una sola ruta (Espinar - Chilloroya) restringe la generalización de los resultados a otros entornos. Nuestra capacidad para examinar a fondo los elementos culturales y organizativos que influyen en la adopción de Lean se vio obstaculizada por el enfoque principal en los aspectos técnicos y operativos de su implementación, que Romo et al. (2024) consideran esenciales para el éxito a largo plazo de estos programas. Teniendo en cuenta no sólo los costes directos de la intervención sino también las ventajas indirectas, como la prolongación de la vida útil de la infraestructura y la disminución de las costosas reparaciones correctivas, una línea de investigación especialmente prometedora sería el análisis del impacto económico a largo plazo de la adopción de la construcción Lean en el mantenimiento de carreteras.

## 5. Conclusiones

- La aplicación de la teoría de la Construcción Esbelta en el mantenimiento diario del sendero Espinar-Chilloroya ha demostrado ser práctica y muy exitosa para impulsar la eficiencia operativa, la calidad de la intervención y el ahorro de costos. Las mejoras documentadas y validadas estadísticamente permiten descartar la hipótesis nula y respaldar la hipótesis alternativa propuesta originalmente: " La aplicación de los principios de la Construcción Esbelta en el mantenimiento diario del sendero Espinar-Chilloroya tiene un impacto favorable notable en la eficiencia, la calidad operativa y la reducción de costos asociada ". La gran escala de las mejoras logradas (79.27% de aumento en TP, 54.56% de caída en TNC, 90.7% de aumento en rendimiento y 18.3% de reducción en costos) sobrepasa lo informado en trabajos comparativos realizados en otros entornos, lo que indica una posibilidad particularmente notable para la implementación de la Construcción Esbelta en el mantenimiento vial altoandino, donde las condiciones desafiantes amplifican el efecto de las optimizaciones. El alcance práctico del impacto produce beneficios medibles y sustanciales: manteniendo la misma área de ruta, equivalente a 4,2 cuadrillas completas, la mejora del 90,7% en el rendimiento (de 86 a 164 m<sup>2</sup>/ día) significa un ahorro mensual de 156 días - hombre. Con los mismos recursos, la disminución del 47,1% en el tiempo de ciclo, de 3,4 días a 1,8 días, permite atender un 89% más de intervenciones mensuales. La reducción del 18,3% en el costo (de 126 a 103 soles/m<sup>2</sup>) proporciona un ahorro anual de 184.320 soles para el mantenimiento de 10 km de ruta promedio. Aumentar la durabilidad de 6,2 meses a 9,5 meses (+53,2%) alarga la vida de los tratamientos, reduciendo así la incidencia de reintervenciones en 35%. Dado que la implementación de Lean produce ahorros anuales de 552,960 soles y la liberación de 1,872 días - hombre para operaciones adicionales de mantenimiento preventivo, la ruta Espinar-Chilloroya requiere aproximadamente 2,400 m<sup>2</sup>. Los desafíos descubiertos, especialmente la resistencia al cambio organizacional y los problemas tecnológicos vinculados a la gran variabilidad y distribución geográfica, exigieron adaptaciones especializadas de las herramientas Lean al entorno local. Este estudio muestra que, con los ajustes correctos y un enfoque sistemático, la filosofía de Construcción Lean puede cambiar significativamente la gestión del mantenimiento en la infraestructura vial en las zonas altoandinas, maximizando así la influencia de las inversiones restringidas en una industria crucial para el desarrollo de las zonas altoandinas al proporcionar ganancias mensurables en eficiencia, calidad y sostenibilidad económica.
- La primera evaluación del mantenimiento rutinario del camino Espinar - Chilloroya mostró importantes deficiencias en eficiencia y productividad. Utilizando Carta Balance, se cuantificó una baja proporción de Trabajo Productivo (TP) de solo 32.2%, un Trabajo Contributivo (TC) de 31.5% y un alto Trabajo No Contributivo (TNC) de 36.3%, este último mucho más del 15% considerado como el umbral máximo aceptable según los estándares internacionales. El análisis exhaustivo descubrió que las esperas representaron el 68.42%, los descansos el 10.41% y los trabajos rehechos el 9.69% de las principales categorías de desperdicios, revelando así problemas estructurales en la gestión del proceso.

- Durante el proceso de parchado superficial, se registraron 12 actividades sin valor agregado; esta condición se agravó por las frecuentes interrupciones en la secuencia de eventos provocadas por la mala coordinación entre los equipos y los problemas logísticos. Con un rendimiento promedio de solo 86 m<sup>2</sup>/día y un costo de 126 soles/m<sup>2</sup>, el tiempo de ciclo inicial para el parchado superficial fue de 3,4 días. Estas métricas sentaron las bases para que el requisito de optimización mediante métodos como Lean Construction fuera claro y medible.*
- Las cuatro fases secuenciales de la implementación de la filosofía Lean Construction (diagnóstico, identificación de desperdicios, implementación de instrumentos y medición /control) enfatizaron tres herramientas particulares adaptadas al contexto del mantenimiento de carreteras: Last Planner System (LPS), Carta Balance y Value Stream Mapping (VSM). La modificación del LPS para adaptarse al contexto altoandino implicó cambios particulares para manejar la gran variabilidad climática y la dispersión geográfica de las actividades utilizando buffers específicos y planificación segmentable. Particularmente en la gerencia media (supervisores y capataces), la resistencia al cambio fue un desafío importante abordado con sesiones de sensibilización. Reconocimiento temprano de logros y participación activa en la toma de decisiones. El fuerte vínculo negativo entre TP\_Despues y TC\_Despues ( $r=-0,882$ ,  $p=0,048$ ), hallado mediante el análisis correlacional entre variables, verificó que una influencia importante en la eficiencia general reside en la mejora de la proporción de trabajo productivo. Estos resultados estadísticos respaldan sustancialmente la eficacia de las tácticas aplicadas para superar los obstáculos culturales y organizacionales detectados.*
  - La implementación de Lean Construction en el mantenimiento diario de la vía Espinar-Chilloroya arrojó mejoras estadísticamente significativas en todos los indicadores evaluados, lo que complementó la instalación de sistemas estructurales que garantizan la sostenibilidad a largo plazo. Mientras que el Trabajo No Contributivo disminuyó del 36,3 % al 16,1 % (-55,58 %,  $p<0,001$ ), el Trabajo Productivo aumentó del 32,2 % al 57,2 % (+77,73 %,  $p<0,001$ ). Los siete subtítulos investigados mostraron cambios constantes, en particular "Colocación de Mezcla Asfáltica", que experimentó un aumento del TP del 132,97 %, del 25,42 % al 59,22 %. La implementación del Last Planner System resultó en una evolución positiva del Porcentaje de Plan Completado (PPC), que creció del 48% en la primera etapa al 89% en la etapa final, mejorando claramente la confiabilidad de la planificación. De 3,4 a 1,8 días (-47,1%), el tiempo de ciclo para el entarimado de superficies disminuyó; el rendimiento promedio aumentó de 86 m<sup>2</sup>/día a 164 m<sup>2</sup>/día (+90,7%); y los precios bajaron de 126 a 103 soles/m<sup>2</sup> (-18,3%). Se establecieron sistemas estructurales de mejora continua para garantizar la sostenibilidad de la implementación. El ciclo PDCA se institucionalizó con reuniones semanales obligatorias de evaluación del PPC y análisis de restricciones, protocolizadas en procedimientos operativos estándar. Se crearon tres facilitadores Lean mediante una rigurosa capacitación de 80 horas, lo que garantizó la transferencia de conocimientos y redujo la dependencia de consultoría externa. Los indicadores de seguimiento automatizados fortalecieron la sostenibilidad: tableros visuales permanentes que exhiben la semana de TP/TC/TNC, sistema de alertas tempranas cuando PPC baja 75%, y auditorías de evolución trimestrales de mantenimiento de estándares 5S. Se estableció un reconocimiento mensual para las ideas de mejora puestas en práctica, promoviendo así una cultura de innovación continua. Al incluir métricas Lean en las revisiones de desempeño del personal de supervisión y asignar un presupuesto específico para iniciativas de mejora continua (aproximadamente el 2,5% del presupuesto anual de mantenimiento), se aseguró el compromiso organizacional. Con intervalos de confianza del 95% que muestran la solidez de las ganancias obtenidas, la validación estadística a través de las pruebas t-Student y Wilcoxon verificó que todas las mejoras observadas son estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ).*
  - Dadas ciertas circunstancias determinadas metodológicamente en este estudio, la replicabilidad del modelo adoptado a otras rutas rurales es posible, ofreciendo así un marco estratégico para el crecimiento de las técnicas de Lean Construction en infraestructura vial equivalente. Las especificaciones técnicas requieren rutas con características comparables (superficie asfaltada, ancho 5-6m, mantenimiento regular continuo) y problemas de TNC superiores al 30%, lo que apunta a un gran potencial de optimización. Entre los elementos organizativos se encuentran equipos estables (mínimo de 12 operarios), una estructura de supervisión claramente definida con al menos un ingeniero residente y un compromiso de gestión de la evidencia para invertir en capacitación especializada (mínimo de 80 horas por facilitador interno). Los factores contextuales incluyen la accesibilidad para sistemas de extracción de materiales, la confiabilidad de los proveedores locales y un presupuesto asignado para las primeras adaptaciones equivalente al 2,5% del presupuesto anual de mantenimiento. Entre los principales factores de éxito encontrados se encuentran: implementación por fases que comienza con proyectos piloto de 3 meses para proporcionar evidencia temprana de las ventajas; adaptación a medida de las herramientas al entorno local (inclusión de amortiguadores climáticos, planificación sectorial, procesos simplificados); creación de facilitadores internos para garantizar la sostenibilidad; y desarrollo de sistemas de reconocimiento que promuevan una cultura de mejora continua. El modelo demostró ser particularmente útil en localidades altoandinas (3500– 4.500 msnm) donde las condiciones difíciles (clima variable, acceso restringido, recursos escasos) potencian las ventajas de la optimización Lean, creando circunstancias donde las ineficiencias iniciales son más notorias y, por lo tanto, surgen mayores oportunidades de mejora. Según extrapolaciones de resultados, los caminos rurales con ineficiencias iniciales comparables podrían experimentar grandes mejoras: entre un 60 % y un 80 % en productividad, entre un 40 % y un 50 % en reducciones de ciclos, entre un 15 % y un 25 % en ahorros de costos y entre un 30 % y un 45 % en la mejora de la durabilidad de las intervenciones. La aplicabilidad del modelo podría alcanzar redes de caminos rurales en entornos geográficos y socioeconómicos similares, ayudando así a maximizar la gestión de la infraestructura pública en zonas con pocos recursos y circunstancias operativas difíciles.*

## 6. Referencias

- Amaral, T. G. do, Oka, L. G., Camargo Filho, C. A. B. de, & Barros Neto, J. de P. (2019).** *Qualitative Analysis for the Diagnosis of the Lean Construction Implementation.* 975–986. <https://doi.org/10.24928/2019/0145>
- Berawi, M. A., Sari, M., Miraj, P., Saroji, G., & Susantono, B. (2023).** *Lean Construction Practice on Toll Road Project Improvement: A Case Study in Developing Country.* *Civil Engineering Journal.* <https://doi.org/10.28991/cej-2023-09-12-016>
- Brito, R. V. J. (2024).** *Uma revisão da literatura sobre lean construction e método construtivo de parede de concreto.* *Colloquium Exactarum,* 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.5747/ce.2024.v16.e428>
- Chinchay Ramirez, B. P., Muñoz Pérez, S. P., Marín Bardales, N. H., & García Chumacera, J. M. (2024).** *Application of the Lean Construction methodology in an urban paving work.* *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería,* 32. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052024000100202>
- Costella, M. F., Bugnotto, G., Pinzon, A., Lopes, P. E., & Dalcanton, F. (2018).** *Proposal and evaluation of a method to implement the lean construction principles.* *Brazilian Journal of Operations & Production Management,* 15(4), 545–557. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2018.V15.N4.A8>
- Darabseh, M. (2019).** *Lean Applications in Construction: Review Article.* 5(2), 29–37. [https://doi.org/10.24840/2183-6493\\_005.002\\_0004](https://doi.org/10.24840/2183-6493_005.002_0004)
- Deng, T., & Tan, Y. (2023).** *Efficient Pavement Distress Detection and Visual Management in Lean Construction Based on BIM and Deep Learnin.* <https://doi.org/10.24928/2023/0230>
- Dhivyamenaga, T. (2014).** *Study on Application of Lean Construction - Quality Rating Model to Construction Companies.* 1(2).
- Fazri, I., & Rahmawati, Y. (2024).** *Study on Lean Construction Implementation in Palembang.* *Arsir,* 8(1), 64–77. <https://doi.org/10.32502/arsir.v8i1.122>
- Filho, J. S. de M., Lima, J., Siqueira, R. A., & Sousa, L. de M. (2024).** *Lean construction: proposta para redução de desperdícios na construção civil – revisão bibliográfica.* *Revista Fisio&terapia.,* 29(140), 16–17. <https://doi.org/10.69849/revistaft/fa10202411281516>
- Gaio, J., & Cachadinha, N. (2011).** *Suitability and benefits of implementing lean production on road works.* 579–589. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-10242166-6150-47ce-8644-a51c0b347e18.pdf>
- Gunawan, K. (2023).** *Lean Construction Through Waste Register Method: A Case Studies Project in Indonesia.* <https://doi.org/10.24928/2023/0204>
- Gupta, P., & Elhag, T. (2025).** *Applicability of lean techniques and processes on improving sustainability in construction projects.* *Built Environment Project and Asset Management.* <https://doi.org/10.1108/bepam-03-2024-0049>
- Hasan, S., Işik, Z., & Demirdöğen, G. (2024).** *Evaluating the Contribution of Lean Construction to Achieving Sustainable Development Goals.* *Sustainability.* <https://doi.org/10.3390/su16083502>
- Jejurkar, S. C., & Kesarkar, R. B. (2024).** *Construction Value by Lean Management.* *Journal of Advances in Science and Technology,* 20(1), 18–21. <https://doi.org/10.29070/dqzbx65>
- Lestari, Y. D., & Adhirajasa, A. R. (2024).** *Implementation of Lean Construction to Reduce Waste with the Value Stream Analysis Tools (VALSAT) Method in the Project Casting Process.* <https://doi.org/10.20473/sabr.v2i2.62011>
- Matos, L. S. de, Prata, B. de A., Nobre Júnior, E. F., & Oliveira, F. H. L. de. (2018).** *Simulation models for implementation of lean production concepts in earthmoving and paving.* *Transportes,* 26(1), 130–141. <https://doi.org/10.14295/TRANSPORTES.V26I1.1405>
- Melo Filho, J. S. de, Lima, J., Siqueira, R. A., & Sousa, L. de M. (2024).** *Lean construction: proposta para redução de desperdícios na construção civil – revisão bibliográfica.* *Revista Fisio&terapia.,* 29(140), 16–17. <https://doi.org/10.69849/revistaft/fa10202411281516>
- Mohammadi, A., Igwe, C., Amador-Jimenez, L., & Nasiri, F. (2020).** *Applying lean construction principles in road maintenance planning and scheduling.* *The International Journal of Construction Management,* 1–11. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1788758>
- Moradi, S., & Sormunen, P. (2023).** *Implementing Lean Construction: A Literature Study of Barriers, Enablers, and Implications.* *Buildings,* 13(2), 556. <https://doi.org/10.3390/buildings13020556>
- Moshood, T. D., Rotimi, J. O. B., Shahzad, W. M., & Salimon, M. G. (2024).** *Enhancing infrastructure project delivery through lean construction: opportunities, challenges and implementation strategies.* *Technological Sustainability.* <https://doi.org/10.1108/techs-11-2023-0041>
- Pereira, A. G. (2024).** *Aplicação da metodologia lean construction no processo executivo dos kits elétricos de uma edificação residencial de estrutura monolítica moldada in-loco localizada na cidade de manaus estado do amazonas.* 28(140), 35–36. <https://doi.org/10.69849/revistaft/pa10202411231935>

- Romo, R., Alejo-Reyes, A., & Orozco, F. (2024).** *Statistical Analysis of Lean Construction Barriers to Optimize Its Implementation Using PLS-SEM and PCA. Buildings.* <https://doi.org/10.3390/buildings14020486>
- Santos, A. A. da S., Ramos, M. E. K., & Gravatá, R. da S. (2024).** *Aplicação do lean construction no controle de perdas de insumos.* <https://doi.org/10.69849/revistaft/ra10202410311302>
- Sharma, N., & Laishram, B. (2023).** *Implementation of Lean Construction to Reduce Rework in Construction Projects: A Systematic Literature Review* (pp. 225–236). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-5455-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-99-5455-1_18)
- Sharma, P. kumar. (2018).** *Enhancement of Highway Project Performance Using Lean Construction Method: A Review.* 8(3), 5–8. <https://doi.org/10.3759/JOCEM.V8I3.1068>
- Sindhu Vaardini U. (2023).** *A Review on Implementing Lean Construction Technique in Construction Industry. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology,* 791–796. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-8920>
- Singh, A., Kumar, V., Mittal, A., & Verma, P. (2023).** *Identifying critical challenges to lean construction adoption. Construction Innovation: Information, Process, Management.* <https://doi.org/10.1108/ci-09-2022-0229>
- Spisakova, M., & Kozlovska, M. (2019).** *Implementation of lean production in construction—case study* (pp. 571–577). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429021596-90>
- U, S. V. (2023).** *A Review on Implementing Lean Construction Technique in Construction Industry. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology,* 791–796. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-8920>

## ANEXOS

### Anexo 1. Evidencia de Sumisión

20/08/25, 10:17 p.m. Gmail - [ric] Submission Acknowledgement



CLEMENTE MIRANDA Lipa  
<clementemiranda777@gmail.com>

---

#### **[ric] Submission Acknowledgement**

---

de: Omar Zegarra Marmanillo  
|Assistant Editor <ric.ing@uc.cl>

20 ago 2025, 10:17,

para: CLEMENTE MIRANDA LIPA  
<clementemiranda777@gmail.com>

fecha: 20 ago 2025, 10:17

asunto: [ric] Submission Acknowledgement

enviado uc.cl  
por:

firmado uc.cl  
por:

CLEMENTE MIRANDA LIPA:

Gracias por enviar el manuscrito «Implementación de la filosofía Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la carretera Espinar-Chilloroya» a la Revista Ingeniería de Construcción. Con el sistema de gestión de revistas en línea que utilizamos, podrá seguir su progreso a lo largo del proceso editorial accediendo al sitio web de la revista.

URL de envío: <https://ojs.uc.cl/index.php/ric/authorDashboard/submission/95896>

Nombre de usuario: 1clemente\_miranda1

Si tiene alguna pregunta, no dude en contactarme. Gracias por considerar esta revista como medio para publicar su trabajo.

Omar Zegarra Marmanillo | Editor asistente

Omar Zegarra Marmanillo

Editor asistente

{JournalName} <http://ojs.uc.cl/index.php/ric>

<https://mail.google.com/mail/u/1/#search/subm/F1f0gzQcpKmZQbskajRxfPbJmddshVbb>

1/1



“AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA”

RESOLUCIÓN N° 0569-2025/UPeU-FIA-CF

Lima, Ñaña, 16 de setiembre de 2025

VISTO:

El expediente de los (las) bachilleres **Clemente Miranda Lipa** identificado(a) con código universitario N° 201520739 y **Heberth Samuel Quispe Valencia** identificado(a) con código universitario N° 201510740, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;  
Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la sustentación de la tesis en formato artículo;  
Que el Comité Dictaminador ha emitido su dictamen aprobando el informe de tesis titulado "Implementación de la filosofía

Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya", presentado por los (las) bachilleres **Clemente Miranda Lipa** y **Heberth Samuel Quispe Valencia**, reuniendo de esta manera las condiciones previas para la declaratoria de expedito para la programación de la sustentación;  
Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 16 de setiembre de 2025, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

1. Declarar expedito a los (las) bachilleres **Clemente Miranda Lipa** y **Heberth Samuel Quispe Valencia**, para que sustenten la tesis en formato artículo titulada "Implementación de la filosofía
2. Lean Construction en el mantenimiento rutinario de la vía Espinar - Chilloroya", conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil, el 08 de octubre a las 11:00 horas, en la modalidad presencial, en el Salón de Actos Wellesley Muir.
3. Designar el Jurado de Sustentación, encargado de gestionar la sustentación respectiva, el mismo que queda constituido por los siguientes miembros:

Presidente: Mtro. Leonel Chahuara Escobar  
Secretario: MSc. Ecler Mamani Chambi  
Asesor: Mg. Heron Duherly Pari Cusi  
Vocal I: Mg. Ruben Fitzgerald Sosa Aquise

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Lic. Gina Marita Tito Tolentino  
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:  
-Intimado  
-Jurado (04)  
-Secretaría General  
-Archivo

Anexo 3. Carta de Balance – Toma de decisiones



FORMATO CARTA BALANCE - TOMA DE DATOS



MEDICION Nº: 01 AREA: PRODUCCION FECHA: 11/01/2025  
 PARTIDA: PARCHADO SUPERFICIAL EN CALZADA (Sección 430) MORTERO ASFALTICO H. INICIO: 6:30 AM  
 MEDIDO POR: CLIENTE MIRANDO LIPA H. FIN: 11:45 AM

RECURSOS DE MANO DE OBRA:  
 O1: ESAU HUAYASA C. O2: EDSON OLIVERO T. O3: GUTIERREZ RODRIGUEZ O4: DEJERO SANCHEZ O.  
 O5: ANDRICO SAICO H. O6: CASIMIRO TACO S. O7: FRANCISCO NUÑEZ Q. O8: LIZBETH HUAYASA T.

ACT. PRODUCTIVAS	
ERP	Excavación y Remoción del Pavimento
LTM	Limpieza y Traslado de Material a Camion Baranda
ISR	Imprimación de Superficie y Riego de liga
PMA	Preparación Manual de Mezcla Asfáltica en frío
TMC	Transporte Mezcla Asfáltica en carretillas
COL	Colocación de Mezcla Asfáltica
COM	Compactación de Mezcla Asfáltica

ACT. CONTRIBUTORIAS	
ISS	Inducción de Seguridad y Salud en obra.
PEM	Preparación de Mezcla Asfáltica con Equipo
TMH	Transporte de Materiales y Herramientas (emulsiones, Arena Tipo III etc.)
TPM	Transporte de Personal en Minivan
CSP / RSP	Colocación / Retiro de Señalización Provisional en la zona de trabajo
MMA	Marcado y Mediciones en de las Áreas a colocar el Mezcla Asfáltica
PMF	Protección del Mortero Fresco (proceso de fraguado)

ACT. NO CONTRIBUTORIAS	
EFM	Esperas por Falta de Suministro de materiales
TMA	Tiempos Muertos por Averías de maquinaria
DIP	Desplazamientos Innecesarios del Personal
RME	Retrabajos por Mala Ejecución o control de calidad
PNP	Pausas No Programadas o excesivamente largas (10 min. Refrigerio)
TPC	Tiempo perdido por mala coordinación entre cuadrillas
NFS	Necesidades Fisiologicas

HORA	CUADRILLA								TRABAJO
	OBRERO 1	OBRERO 2	OBRERO 3	OBRERO 4	OBRERO 5	OBRERO 6	OBRERO 7	OBRERO 8	
06:45	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	
07:00	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	
07:15	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	
07:30	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	
07:45	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	
08:00	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	
08:15	CSP	COL	CSP	COL	PMA	TMC	COM	MMA	
08:30	ERP	COL	COM	COL	PMA	TMC	COM	MMA	
08:45	ERP	COL	ISR	COL	PMA	TMC	COM	MMA	
09:00	ERP	COL	LTM	COL	PMA	TMC	COM	MMA	
09:15	ERP	COL	ISR	COL	PMA	TMC	COM	COL	
09:30	ERP	COL	LTM	COL	PMA	TMC	COM	COL	
09:45	PNP	PNP	PNP	PNP	PNP	PNP	PNP	PNP	Refrigerio 10 min
10:00	COL	COL	ISR	COL	PMA	TMC	COM	PME	
10:15	COL	COL	LTM	COL	PMA	TMC	COM	PME	
10:30	RSP	COL	RSP	COL	PMA	TMC	COM	PMA	
10:45									
11:00									
11:15									
11:30									
11:45									
12:00									
12:15									
12:30									
12:45									
13:00									
13:15									
13:30									
13:45									
14:00									
15:15									
16:30									

MEDICION Nº: 2 AREA: PRODUCCION FECHA: 16/01/2025  
 PARTIDA: PARCHADO SUPERFICIAL EN CALZADA (Sección 420) MORTERO ASFALTICO (Slurry). H. INICIO: 6:30 AM  
 MEDIDO POR: OLEIBERTO MIRENAN LIZO H. FIN: 14:00

RECURSOS DE MANO DE OBRA:  
 O1: ESAU ARMANDO S. O2: ERASER CUAJERO T. O3: GONZALEZ CAYLANE O4: SEVERO SENIA D.  
 O5: ANDRÉS BAJO H. O6: CRISTINA BOTO S. O7: FABIANOS NÚÑEZ G. O8: LITZER HUBBAY T.

ACT. PRODUCTIVAS	
ERP	Excavacion y Remoción del Pavimento
LTM	Limpeza y Traslado de Material a Camión Baranda
ISR	Imprimación de Superficie y Riego de Ilga
PMA	Preparacion Manual de Mezcla Asfáltica en frío
TMC	Transporte Mezcla Asfáltica en carretillas
COL	Colocación de Mezcla Asfáltica
CDM	Compactación de Mezcla Asfáltica

ACT. CONTRIBUTORIAS	
ISS	Induccion de Seguridad y Salud en obra.
PEM	Preparacion de Mezcla Asfáltica con Equipo
TMH	Transporte de Materiales y Herramientas (emulsiones, Arena Tipo III etc.)
TPM	Transporte de Personal en Minivan
CSP / RSP	Colocación / Retiro de Señalización Provisional en la zona de trabajo
MMA	Marcado y Mediciones en de las Áreas a colocar el Mezcla Asfáltica
PMF	Proteccion del Mortero Fresco (proceso de fraguado)

ACT. NO CONTRIBUTORIAS	
EPM EFA	Esperas por Falta de Suministro de materiales
TMA	Tiempos Muertos por Averías de maquinaria
DIP	Desplazamientos Innecesarios del Personal
RME	Retrabajos por Mala Ejecución o control de calidad
PNP	Pausas No Programadas o excesivamente largas (10 min. Refrigerio)
TPC	Tiempo perdido por mala coordinación entre cuadrillas
NFS	Necesidades Fisiologicas

HORA	CUADRILLA								TRABAJO
	OBRAERO 1	OBRAERO 2	OBRAERO 3	OBRAERO 4	OBRAERO 5	OBRAERO 6	OBRAERO 7	OBRAERO 8	
06:45	EFA	EFA	EFA	EFA	EF				Desayuno personal
07:00	EFA	EFA	EFA	EFA	EFA				Desayuno personal
07:15	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	ISS	
07:30	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	TMH	
07:45	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	
08:00	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	TPM	
08:15	TPM	CSP	CSP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
08:30	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
08:45	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
09:00	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
09:15	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
09:30	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
09:45	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
10:00	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
10:15	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
10:30	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
10:45	PMP	TMC	PMP	PMP	PMP	PMP	PMP	PMP	Refrigerio Lomus
11:00	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
11:15	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
11:30	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
11:45									Pase de Convey (Ten)
12:00	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	PTA	
12:15	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	PTA	
12:30									Almuerzo personal
12:45									Almuerzo personal
13:00									Almuerzo personal
13:15									Almuerzo personal
13:30	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
13:45	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
14:00	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
14:15	TMC	TMC	ERP	ISR	PTA	PTA	CON	COL	
14:30	TMC	TMC	ERP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
14:45	TMC	COL	GRP	LTM	PTA	PTA	CON	COL	
15:00	COL	RSP	RSP	LTM	PTA	COL	CON	COL	